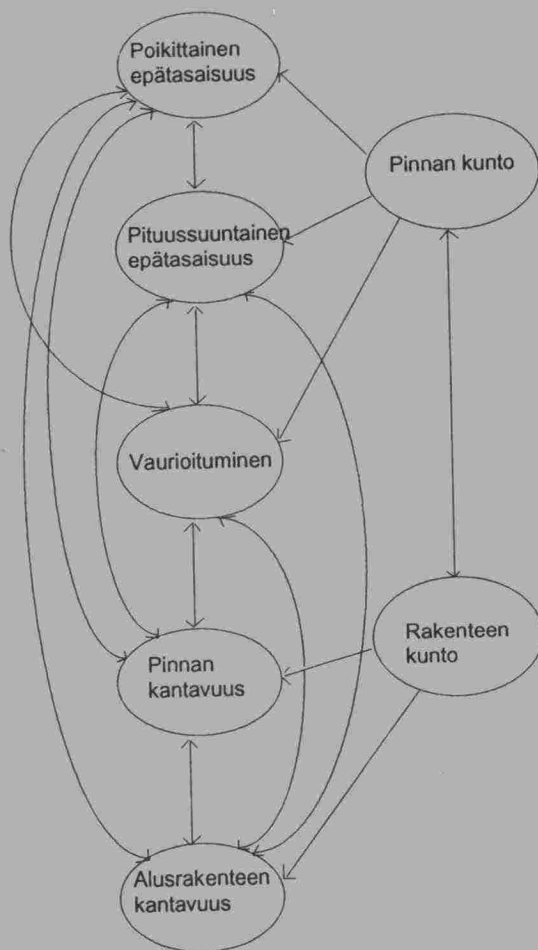


Tielaitos

Tuula Kyyrä

Kestopäällysteteiden kunnon piilorakennemalli



Tielaitoksen
selvityksiä

47/1992

Helsinki 1992

Tiehallitus
Tuotannon
kehittämispalvelut

Tielaitoksen selvityksiä
47/1992

Tuula Kyyrä

Kestopäällysteteiden kunnon piilorakennemalli

Tielaitos

Tiehallitus, tuotannon kehittämispalvelut

Helsinki 1992

ISBN 951-47-6511-7

ISSN 0788-3722

TIEL 3200100

Valtion painatuskeskus

Pasilan VALTIMO

Helsinki 1992

Julkaisua myy:

Tiehallitus, painotuotevarasto

Tielaitos

Tiehallitus

Opastinsilta 12 A

PL 33

00521 HELSINKI

Puh. vaihde (90) 148 721

ALKUSANAT

Raportissa esitetään tilastollinen malli, jolla kuvataan Suomen kestopäälysteteiden kunnon muodostuminen tiestä mitatuista useista kuntomuuttujista. Tilastollisena menetelmänä on LISREL-malli.

Tutkimuksen on suorittanut tutkija Tuula Kyyrä. Työhön ovat osallistuneet erikoistutkija Riitta Olsonen ja erikoissuunnittelija Kari Hiltunen.

Helsingissä syyskuussa 1992

Tiehallitus

Tuotannon kehittämispalvelut

Asiasanat: LISREL-malli, faktorianalyysi, tien kunto

TIIVISTELMÄ

Työssä tutkitaan kestopäällystetiedon kuntomuuttujien korrelaatioita. Muuttujien korrelaatorakenteen avulla muodostetaan kuvaus kestopäällystetiedon kunto-ominaisuuksien keskinäisille riippuvuuksille käyttämällä LISREL-malleihin kuuluvaa toisen kertaluvun konfirmatorista faktorianalyysiä. Analyysissä tutkitaan vuoden 1991 kuntomittauksia, ajassa tapahtuvaan kuntotekijöiden väliseen korrelaation muutokseen ei paneuduta.

Tutkimuksessa on kuvattu kuntomuuttujien eri mittausmenetelmiä: palvelutasomittaus, vaurioinventointia ja pudotuspainolaitemittaus. Palvelutasomittaus tuottaa tien tasaisuusmuuttujat ja vaurioinventointi tien pinnan halkeamat, reiät ja muut vauriot. Pudotuspainolaitteella tehtävässä kantavuusmittauksessa tutkitaan tien rakennekerrosten kantavuusominaisuuksia.

Tien kuntomuuttujat ryhmitetään viiteen tien kuntoa kuvaavaan ryhmään: poikittaiseen epätasaisuuteen, pituussuuntaiseen epätasaisuuteen, vaurioihin, päällysrakenteen yläosien kantavuuteen sekä yhdistettyyn päällysrakenteen alaosien ja alusrakenteen kantavuuteen. Analyysin perusteella on löydetty kutakin ryhmää kuvaavat kuntomuuttujat. Kuntomuuttujaryhmien väliset korrelaatiot osoittavat tien eri kunto-ominaisuuksien korreloivan voimakkaasti keskenään, kantavuusmuuttujien voisi ajatella muodostavan vain yhden kuntomuuttujaryhmän, tien kantavuuden. Poikittaisen epätasaisuuden riippuvuutta muista ryhmistä ei pystytty osoittamaan.

Kestopäällystetiedon kunnon kuvausjärjestelmään liitetään tien kokonaiskuntoa kuvaavat käsitteet. Tien pinnan kunnolla kuvataan autoilijan näkemystä tien pinnan laadusta ja rakenteen kunto kuvaa tien rakenteellista kuntoa. Voimakkaasta korrelaatiosta (-0.86) voidaan päätellä, että tien rakenteen kunto vaikuttaa tien pinnan kuntoon. Käytettävissä olevat kantavuusmuuttujat kuvaavat paremmin tien rakenteen kuntoa kuin pintakunnon muuttujat tien pinnan kuntoa. Päällysrakenteen yläosien kantavuusmuuttujien vaihtelusta 60 % ja päällysrakenteen alaosien sekä alusrakenteen kantavuusmuuttujien vaihtelusta 70 % kuvaa tien rakenteen kuntoa, kun vastaavasti vaurioiden vaihtelusta 45 % ja tasaisuuden vaihtelusta 43 % kuvaa tien pinnan kuntoa. Lisäksi tien yleiskunnolle on tärkeämpää tien rakenteellinen kunto kuin pinnan kunto.

Kunkin ryhmän muuttujista muodostetaan uudet muuttujat, jotka tiivistävät koko ryhmän muuttujien kuntoinformaation. Näihin muuttujiin perustuen lasketaan nollasta sataan vaihtelevat kuntoindeksit kuntomuuttujaryhmille, tien pinnan ja rakenteen kunnolle että tien yleiskunnolle.

Keywords: LISREL model, factor analysis, road condition

ABSTRACT

Correlations between road condition variables of asphalt concrete roads are examined. The correlations are used to formulate dependencies between different road condition aspects with a second order confirmatory factor analysis method belonging to LISREL models. The analysis is based on measurements made in 1991.

Different data collection methods for asphalt concrete road condition measurements are described in the study. Longitudinal and transverse roughness is measured using a high speed moving measuring vehicle, distress variables are gathered with visual inspection of defects and a falling weight deflectometer is used for different bearing capacity variables to measure road structure condition.

The variables are divided into five groups called transverse roughness, longitudinal roughness, distress, pavement bearing capacity and subgrade bearing capacity. Good explanatory variables for groups are found in the analysis. The correlations between variable groups show strong dependency between these groups. The two bearing capacity groups might have been unified into only one bearing capacity group. Only the dependencies between transverse roughness and other groups were negligible.

The model also includes concepts for general road condition. Surface condition describes driving quality and structure condition describes structural strength. The strong correlation -0.86 between these two road condition components shows the importance of structure to road surface condition. The available road structure variables are more efficient in describing road structure condition than the surface variables are in describing road surface condition, because 60 % of variation in the pavement bearing capacity variables can be utilized to measure structure condition and 70 % of variation in the subgrade bearing capacity variables can be utilized in structure condition formulation. The corresponding figures for surface condition are 45 % for distress and 43 % for longitudinal roughness. Bearing capacity is also more important for general road condition than surface condition.

Road condition indices are produced to describe road condition with fewer variables while still utilizing all measurement data. The condition indices are calculated both for road condition groups and for road surface, structure and general condition.

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	11
2 TIEN KUNTO	14
2.1 Rakennettu tie	
2.1.1 Rakenne	14
2.1.2 Rakenteen mitoitus	15
2.2 Vaurioituminen	16
2.2.1 Pysyvät muodonmuutokset	16
2.2.2 Epätasaisuus	18
2.2.3 Vauriot	19
2.3 Vaurioitumisen mallitus	20
2.4 Kuntoindeksit	21
3 LISREL-MALLI	23
3.1 Yleistä	23
3.1.1 Oletukset	23
3.1.2 Mallin ratkaisu	25
3.1.3 Mittausvirhe	26
3.2 Mallin rakentaminen	27
3.2.1 Spesifiointi	27
3.2.2 Identifioituvuus	28
3.2.3 Estimointi	29
3.2.4 Hypoteesien testaus	31
3.2.5 Riittävyystarkastelut	32
3.3 Faktorianalyysi	35
3.3.1 Klassinen faktorianalyysi	35
3.3.2 Ensimmäisen kertaluvun konfirmatorinen faktorianalyysi	37
3.3.3 Toisen kertaluvun konfirmatorinen faktorianalyysi	39
3.3.4 Faktorimallin identifioituvuus	40
3.3.5 Faktoripistemäärät	41

4 AINEISTO JA HYPOTEESEIT	42
4.1 Mittausmenetelmät	42
4.1.1 Poikittaisen ja pituussuuntaisen epätasaisuuden mittaus	43
4.1.2 Vaurioinventointi	47
4.1.3 Kantavuuden mittaus	48
4.2 Aineiston kuvaus	51
4.3 Muunnokset	52
4.4 Korrelaatiomatriisi	54
4.5 Mallin spesifikaatio	56
4.5.1 Ensimmäisen kertaluvun faktorit	57
4.5.2 Faktoreiden korrelaatiot	58
4.5.3 Toisen kertaluvun faktorit	59
5 ESTIMOINTI	60
6 TULOKSET	61
6.1 Malli ja sen tilastollinen riittävyys	61
6.2 Ensimmäisen kertaluvun faktorit	63
6.3 Kuntoindeksit	66
6.4 Faktoreiden korrelaatiot	67
6.5 Pinnan ja rakenteen kunto	69
6.6 Tien yleiskunto	70
7 YHTEENVETO	72
8 LÄHTEET	75
9 LIITTEET	
Liite 1 Teoreettisen kovarianssimatriisin laskenta	78
Liite 2 Identifioituvuuden tarkistus toisen kertaluvun faktoreille	79
Liite 3 Tutkielman muuttujat	81
Liite 4 Kuntoindeksit	82

Käytetyt symbolit ja lyhenteet

Kuvioissa:



Suorakaidetta käytetään havaitun muuttujan merkintänä. Muuttuja merkitään neliön sisään.



Faktorit merkitään ellipsillä. Faktori merkitään kreikkalaisin aakkosin ellipsin sisään.



Kaksisuuntainen nuoli kuvaa muuttujien välistä korrelaatiota tai kovarianssia.



Yksisuuntainen nuoli kuvaa kahden muuttujan välistä yksisuuntaista vaikutusta.

Yhtälöissä:

y, ξ

(Pysty)vektorit merkitään pienillä lihavoiduilla kirjaimilla.

y'

vektorin y transpoosi

Φ, Σ, T

Matriisit merkitään isoilla lihavoiduilla kirjaimilla.

T'

matriisin T transpoosi

Σ^{-1}

matriisin Σ käänteismatriisi

$|\Sigma|$

matriisin Σ determinantti

$\text{tr}\Sigma$

matriisin Σ jälki (trace)

Σ_i

summausten indeksointi

\log

e-kantainen logaritmi

$\text{var}(\mathbf{x})$

vektorin \mathbf{x} varianssi

$\text{cov}(\mathbf{x})$

vektorin \mathbf{x} kovarianssi

1 JOHDANTO

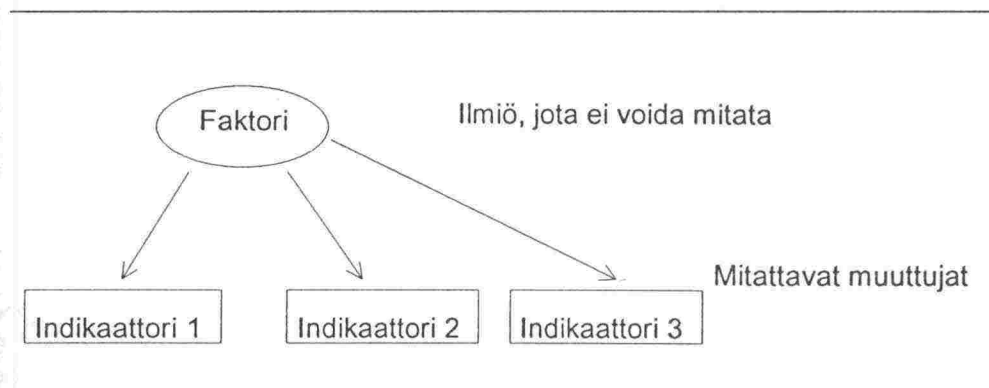
Tie rakennetaan kestäväksi siihen kohdistuva liikennekulutus ja ympäristön vaikutus. Mitä enemmän tielle arvioidaan tulevan liikennettä, sitä vahvemmaksi rakenne mitoitetaan. Tien vanhetessa alusrakenne antaa myöden, rakennekerrokset pettävät ja tien pintaan syntyy vaurioita.

Tien kuntoa havainnoidaan visuaalisesti sekä mitataan objektiivisemmillä tien kuntomittauksilla. Muuttujat kuvaavat sekä tien pinnan että rakenteen kuntoa. Pinnan kunto mitataan vaurioina, epätasaisuutena, urautuneisuutena ja rakenteen kunto alusrakenteen ja pintarakenteiden kantavuutena. Kuntomuuttujien mittausmenetelmiä ovat palvelutasomittaus, vaurioinventointi ja pudotuspainolaitemittaus. Kuntotietoja käytetään raportoitaessa teiden yleiskuntoa, ennustettaessa tien tulevaa kuntoa ja erityisesti suunniteltaessa uusia kunnostustoimenpiteitä.

Ben-Akiva ja Ramaswamy (1989) ovat esittäneet, että tien kunnan todellinen tila ei selviä suoraan yksittäisillä mitatuilla kuntomuuttujilla. Tien kunto näkyy mitattujen kuntomuuttujien arvoissa, mutta niistä ei selviä tien todellinen kuntotila. Mitatut kuntomuuttujat ovat vain lähimmät visuaalisella havainnoinnilla, teknisillä apuvälineillä ja muilla menetelmillä saadut arviot tien kuntotilasta. Teknisillä apuvälineillä poistetaan subjektiivisissa mittausmenetelmissä syntyvää virhettä, joka johtuu mittaajasta. Mittauksessa syntyvän mittausvirheen lisäksi todellisuudessa ei aina tiedetä, onko mitatulla muuttujalla edes pystytty kuvaamaan haluttua tien kunnan piirrettä.

Kun tarkasteltavaa ominaisuutta ei voida mitata perusjoukosta suoraan, mittauksessa olevaa virhettä tutkitaan käyttäen tilastollisena apuvälineenä faktorianalyysiä. Siinä tarkasteltavaa ominaisuutta nimetään faktoriksi eli piilomuuttujaksi. Kuvan 1.1 piilomuuttujana voisi olla tien vaurioituneisuus, jota ei pystytä mittaamaan suoraan, vaan mittauksessa käytetään indikaattorimuuttujia, jotka ovat mitattavissa. Havaitut ja mitatut indikaattorimuuttujat ovat arvioita todelliselle vaurioitumiselle. Indikaattoreina vaurioituneisuudesta ovat esimerkiksi halkeamat, reiät, purkaumat ja paikkaukset. Faktorin olemassaolo havaitaan keskenään voimakkaasti korreloivista indikaattorimuuttujista. Indikaattorimuuttujat muodostavat kuntomuuttujaryhmän, jolla voidaan kuvata faktorin piirteet. Faktoria kuvaa hyvin muuttuja, jonka

faktorilataus on itseisarvoltaan suuri. Faktoreita on tyypillisesti vähemmän kuin alkuperäisiä muuttujia.



Kuva 1.1: Faktorin indikaattorimuuttujat pystytään mittaamaan.

Faktorianalyysiä voidaan laajentaa vielä yleisemmäksi piilorakennemalliksi (Latent Structure Models), joita ovat esimerkiksi LISREL-mallit (Linear Structural RELation) (Jöreskog, 1979). Tällöin tehdään yhteenvetoa indikaattorimuuttujien välisistä korrelaatio-suhteista niin, että faktoreilla voidaan luonnehtia, luokitella ja hahmottaa ilmiöiden peruselementtejä. LISREL-mallissa tutkitaan indikaattorimuuttujien korrelaatioita ja pyritään löytämään niiden taustalla vaikuttava perusrakenne, kuvausjärjestelmä, jossa etsitään todellisuuden vastineita jollekin teoreettiselle käsitteelle.

Tässä työssä tutkitaan kestopäällysteteiden kuntomuuttujien korrelaatorakennetta. Tutkielmassa etsitään kuntokuntomuuttujien taustalla vaikuttavat faktorit: urat, tasaisuus, vauriot, päällysrakenteen kantavuus ja alusrakenteen kantavuus. Faktorit kuvaavat poikittaista tien epätasaisuutta, pituussuuntaista epätasaisuutta, vaurioita, päällysrakenteen yläosien ja yhdistettyä päällysrakenteen alaosien ja alusrakenteen kantavuutta. Faktoreiden muodostamisessa tutkitaan eri kuntomuuttujien merkitystä faktoreille ja analysoidaan, mikä kuntomuuttujista kuvaa parhaiten faktoreita. Mitä parempaa faktorin mittaussuoritus muuttuja osoittaa, sitä vähemmän se sisältää mittausvirhettä. Muuttujan reliabiliteetti eli luotettavuus on tällöin hyvä.

Tutkimuksessa tarkasteltavien faktoreiden olemassaoloa on tutkittu aiemmin klassisella faktorianalyysillä, jossa tien kuntomuuttujia luokiteltiin myöskin samaa ilmiötä kuvaaviin ryhmiin (Talvitie ja Olsonen, 1988). Tällöin faktoreiksi muodostuivat urat ja vauriot, kantavuus, geometria, tien leveys, liikennemäärä ja onnettomuudet. Tähän tutkimukseen perustuu tielaitoksen nykyinen käsitys kestopäällysteteiden

kunnan faktoreista, jotka ovat urat, vauriot, tasaisuus ja kantavuus. Faktoreita käytetään yksinkertaistetussa muodossa, eli ne mitataan vain yhdellä indikaattorimuuttujalla. Urina käytetään urasyvyyttä (mm), tasaisuutena IRI:ä (International Roughness Index, mm/m) ja kantavuutena kevätkantavuutta (MN/m^2). Vaurioita kuvaa kaikista vaurioista muodostettu vauriosumma (m^2) (ks. 2.4).

Kestopäällysteteiden kunnan kuvausjärjestelmään on liitetty toisen kertaluvun faktorit. Niillä tutkitaan, kuvaavatko faktorit (urat, tasaisuus, vauriot, päällysrakenteen ja alusrakenteen kantavuus) edelleen tien pinnan ja rakenteen kuntoa. Tien pinnan kunto, ts. tien ajettavuus, on tienkäyttäjän kannalta tärkein aspekti tien kunnolle, kun taas tien rakenne on tärkeä tien ylläpitäjän näkökulmasta. Tien pinnan ja rakenteen kunnan lisäksi tutkitaan tien yleiskuntoa.

Faktorianalyysillä lasketaan faktoreita vastaavat kuntomuuttujat. Kuntomuuttujat painotetaan kertoimilla (faktoripistemääräkertoimilla) tien kunto-ominaisuuksia kuvaaviksi vaurio-, päällysrakenteen kantavuus-, alusrakenteen kantavuus-, tasaisuus- ja uramuuttujiksi. Myös tien pinnan ja rakenteen kunnolle sekä tien yleiskunnolle voidaan muodostaa muuttujat. Näiden muuttujien avulla voidaan edelleen tehdä lineaarisen regressioanalyysin avulla halutun vaihteluvälin (nollasta sataan) kuntoindeksit. Tien ajettavuus- ja rakenneindeksejä on hahmoteltu useissa kansainvälisissä tutkimuksissa kuten esimerkiksi artikkelissa Ben-Akiva ja Ramaswamy (1989).

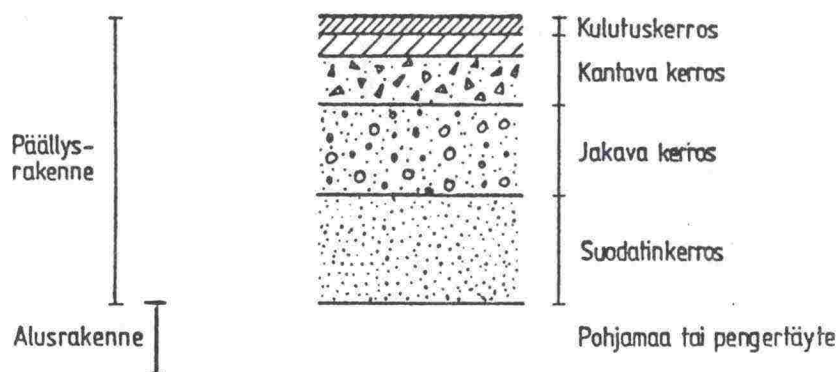
Luvussa kaksi käsitellään tien rakennetta, vaurioitumista ja tien kunnan kuntoindeksejä. Luvussa kolme tarkastellaan tutkimuksessa käytettävän LISREL-malleihin kuuluvan toisen kertaluvun konfirmatorisen faktorianalyysimallin teoriaa. Luvussa neljä esitellään kestopäällysteteiltä kerättäviä kuntotietoja ja esitetään tutkimuksen mallin rakenne. Luvuissa viisi, kuusi ja seitsemän esitetään mallin estimointi, tulokset ja johtopäätökset.

2 TIEN KUNTO

2.1 Rakennettu tie

2.1.1 Rakenne

Rakennettu tie jakaantuu alusrakenteeseen ja päällysrakenteeseen. Alusrakenne muodostuu tien tasatusta ja tiivistetystä maapohjasta, tien pengertäyhteistä, leikkaus- ja pengerluiskista sekä kuivauslaitteista kuten salaojista. Alusrakenteessa käytettäviä maalajeja ovat esimerkiksi kallio, murskesora, sora, hiekka ja savi. Päällysrakenteen mukaan tiet jaotellaan joko jäykkiin, esimerkiksi betonipäällysteisiin teihin, tai taipuisiin teihin, joita ovat esimerkiksi asfaltti- ja öljysora-päällysteet. Taipuisa päällysrakenne muodostuu useasta päällekkäisestä kerroksesta, joista alin kerros on suodatinkerros, seuraavana ovat jakava ja kantava kerros ja ylin kerros on kulutuskerros (kuva 2.1). (Parantainen, 1982 s. 4 - 10).



Kuva 2.1: Tien rakenne.

Suodatinkerros rakennetaan vain hienorakenteisen alusrakenteen päälle (hiesu, hieta tai hiekka), ja jakava kerros tehdään suodatinkerrosen päälle sorasta, murskeesta, murskesorasta tai louheesta. Kantava kerros tehdään murskesorasta ja sen yläosa bitumilla sidotusta aineksesta, esimerkiksi bitumisorasta. Tierakenteen bitumia tai sementtiä sisältävää kerrosta kutsutaan sidotuksi kerrokseksi erotuksena sitomattomalle kerrokselle. (Parantainen, 1982 s. 6 - 10).

Kulutuskerros on päällysrakenteen ylin kerros ja tien ajopinta. Se suojelee tierakennetta ja estää veden pääsyn alempiin kerroksiin. Tiet luokitellaan päällysrakenteen mukaan kestopäällyste-, kevytpäällyste- ja sorateihin. Kestopäällystetien päällysteaineita ovat asfalttibetoni, sementtibetoni, bitumisora, valuasfaltti, kiveys ja sirotepinnattu kestopäällyste. Kestopäällysteteistä suurin osa on asfalttipäällysteisiä. Asfaltti on sideaineksen (yleensä bitumin) ja kiviaineksen seos. (Lehtipuu, 1983 s.24). Kevytpäällysteisen tien päällystemateriaaleja ovat kevytasfaltti, öljysora, bitumiliuossora, imeytys- ja pintakäsittely ja sirotepinnattu kevytpäällyste yms. Soratiet ovat sorapäällysteisiä teitä tai sorateitä pintauksella. (TIEL, 1990b s.4). Suomen n. 77 050 kilometrin tieverkosta on asfalttipäällysteisiä 20%, öljysorateita 40% ja sorapäällysteisiä 40% (TIEL, 1990a). Tässä tutkimuksessa käsitellään vain kestopäällysteteitä.

2.1.2 Rakenteen mitoitus

Päällysrakenne mitoitetaan niin, että tien rakenteellinen palvelutaso säilyy mahdollisimman pienillä kustannuksilla rakenteen suunnitellun käyttöiän ajan. Rakenteellisella palvelutasolla tarkoitetaan tien kantavuutta, pinnan tasaisuutta ja eheyttä. Kulunut ja vaurioitunut tie päällystetään tien käyttöiän pidentämiseksi. Rakenteen käyttöikä ei ole tien tekninen loppuunkulumisaika vaan taloudellinen kestoikä, jossa huomioidaan korjaus- ja kunnossapitokustannukset. (Parantainen, 1982 s. 70).

Tien rakenteella tavoitellaan tielle kantavuutta, jolla tarkoitetaan tierakenteen kykyä kestää liikennekuormitusta ja estää pysyviä muodonmuutoksia (ks. 2.2.1). Kantava kerros muodostaa joustavan pohjan kulutuskerrokselle ja yhdessä jakavan kerroksen kanssa lisää tien kantavuutta. Jakavan kerroksen avulla katkaistaan veden nousu tierakenteeseen, kuitenkin tien kantavuus vaihtelee kausittain: keväällä roudan sulaessa tierakenteessa oleva vesi pienentää kantavuutta ja tielle voidaan asettaa painorajoituksia; kesällä kuivan ja toisaalta talvella jäisen tien kantavuus on hyvä. Kunnollinen ojitus ja hyvä päällyste edistävät tien kantavuuden pysyvyyttä. (Parantainen, 1982 s.6-10). Lämpötila vaikuttaa tiessä olevaan veteen. Päällysteen huokosissa olevan kosteuden toistuva jäätyminen ja sulaminen heikentää tien kulutuskestävyyttä ja huonontaa tien rakennetta. (TVH, 1984 s.10). Tien rakennetta rasittavat erityisesti raskaat ajoneuvot, ja rasitus on sitä suurempaa mitä enemmän liikennettä on. Tiestön

rakenteen ja siten kantavuuden heikkous on ongelma maan keski- ja pohjoisosien alemmalla tieverkolla (TIEL, 1990a s.13).

Toinen tien rakenteen tavoite on roudankestävyys. Rakenne mitoitetaan kestävästi routimista, joka aiheuttaa vaurioita tien rakenteeseen ja pintaan. Tien palvelutason on säilyttävä keväällä roudan sulaessa. Maassa olevan veden jäätymistä kutsutaan routaantumiseksi. Roudan muodostumiseen vaikuttavat tien maalaji, vesipitoisuus, lämpötila, kuormitus, tiiviys ja routaantumisenopeus. Jos maan routaantuessa tai roudan sulaessa syntyy vaurioita, kutsutaan sitä routimiseksi. Routimisessa maan pinta liikkuu tai maan fyysiset ominaisuudet muuttuvat. Kaikki maalajit routaantuvat talvisin, mutta eivät välttämättä roudi. Routimattomia maalajeja ovat esimerkiksi sora ja hiekka, routivia maalajeja ovat puolestaan savi ja moreenit. Roudan torjuntakeinoina käytetään tierakenteessa päällysrakenteen vahvistamista, lämpöeristeitä ja nk. siirtymärakenteita. (Mäkelä, 1980 s.2).

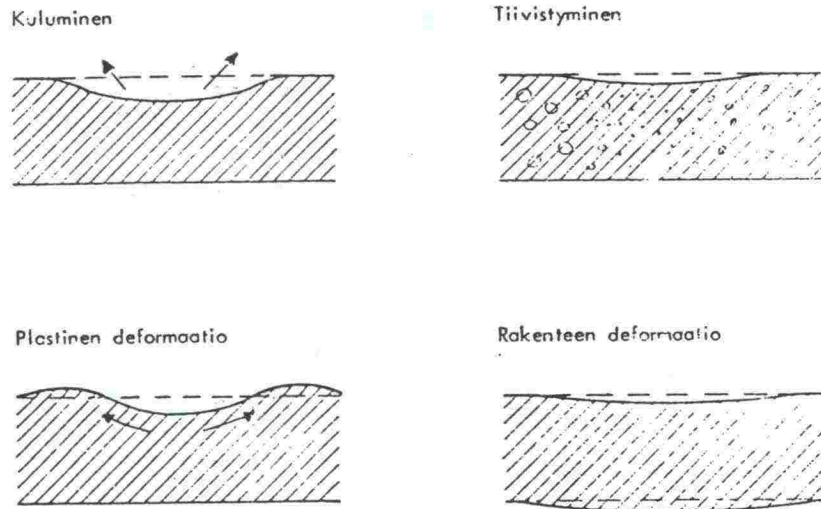
2.2 Vaurioituminen

Tien vaurioitumista ovat tien pysyvät muodonmuutokset, tien poikittainen ja pituussuuntainen epätasaisuus sekä erilaiset tien yksittäisvauriot kuten pituus-, poikittais-, sauma- ja verkkohalkeamat, purkaumat ja reiät. Osa tien vaurioista syntyy jo työvirheistä tietä rakennettaessa. Sekä ilmasto- ja sääolosuhteet että liikennekulutus aiheuttavat vaurioita lisää. Lisäksi vauriot edistävät toisten vaurioiden syntymistä. Tien vauriot osoittavat myös, että tien rakenne on heikentynyt.

2.2.1 Pysyvät muodonmuutokset

Tien pysyvät muodonmuutokset ovat erilaisia päällysteen ja rakenteen muutoksia (kuva 2.2). Tien muodonmuutokset näkyvät tien pinnassa esimerkiksi urina ja purkaumina.

Kulumisessa asfaltin kiviaines jauhautuu hienommaksi ja päällysteen aines irtoaa. Tätä aiheuttavat etenkin nastarenkaat. Lämpötila vaikuttaa kulumiseen, pienimmillään kulumisen on 0 °C:ssa. Tätä alemmassa lämpötilassa tie kuluu enemmän, koska lämpötilan laskiessa renkaan kumi on jäykkä, jolloin nastan pistovoima kasvaa. Samalla asfalttitiien bitumi on haurasta. 0 °C:sta korkeammassa lämpötilassa bitumi muuttuu elastisemmaksi, joten nasta tunkeutuu asfalttiin syvemmälle ja irroittaa sitä enemmän. Lämpötilaltaan Etelä-Suomi on edullisemmassa asemassa kuin Pohjois-Suomi. (TVH, 1984 s.10).



Kuva 2.2: Tien pysyvät muodonmuutokset.

Päällyste tiivistyy, kun siitä poistuu vettä ja ilmaa, eli kun päällysteen tyhjätila vähenee. (TVH, 1984 s.10). Päällysteen tiivistyminen näkyy esimerkiksi uudessa asfalttipäällysteessä alkavana urautumisena, joka ei vielä johdu päällysteen kulumisesta. Plastisessa deformaatiossa asfaltti siirtyy paineen vaikutuksesta pyöräurien kohdalta sivuille ja ylös. Sen aiheuttajina ovat raskaat ja hitaat kuormitukset sekä päällysteen korkea lämpötila. Vaurio on tyypillinen bussipysäkeillä, risteyksissä ja liikennevaloissa. Tierakenteen deformaatio on tierakenteen painumista, joka johtuu tien päällysrakenteen ja alusrakenteen tiivistymisestä ja murtumisesta. (Parantainen, 1982 s.69).

Ilmasto- ja sääolosuhteet vaikuttavat pysyviin muodonmuutoksiin, koska kosteus ja lämpötila vaikuttavat sekä alusrakenteen että päällysrakenteen kestävyYTEEN. Päällyste kuluu märkänä 2-7 kertaa niin nopeasti kuin kuivana; märän kiven lujuus on puolet kuivan kiven lujuudesta. Etelä-Suomen rannikon kostea ilma nopeuttaa tien kulumista verrattuna Pohjois-Suomeen. Etelä-Suomen vilkasliikenteisillä teillä käytetään lisäksi suolaa, joka pitää tien kosteana pitkään, jolloin autot pääsevät kuluttamaan lumesta ja jäädästä vapaana olevaa tien pintaa. (TVH, 1984 s.10).

2.2.2 Epätasaisuus

Nastarenkaiden kulutus ja raskas liikenne aiheuttavat ajorataan vasemman ja oikean pyörän kohdalle keski- ja reunauran, jotka aiheuttavat tiehen poikittaista epätasaisuutta. Tien rakenteiden ja pohjamaan painuminen vaikuttavat myös urien muodostumiseen. Urien aiheuttama haitta lisääntyy huonolla ajokelillä. Urista roiskuva likainen vesi aiheuttaa vaaratilanteita huonontamalla näkyvyyttä, joka lisää onnettomuusriskiä. Vesi ei pääse virtaamaan sivusuunnassa urasta pois ja uran reunojen jyrkkä kaltevuus vaikeuttaa ajoa. Uriin jäävää sohjoa, lunta ja jäätä on vaikea poistaa, mikä aiheuttaa kitkan pienenemistä tien ja renkaan välissä. (VTT, 1983 s. 9 - 10).

Keski- ja reunauran lisäksi tiessä havaitaan muuta tien sivuprofiilin urautumista. Poikittainen epätasaisuus mitataan poikkeamana tien sivuprofiiliin muodostetun ns. oikotason erosta tien pintaan (ks. 4.1.1). Renkaiden aiheuttaman kulutuksen lisäksi poikittaisen epätasaisuuden katsotaan johtuvan tien heikosta kantavuudesta.

Urat ja poikittainen epätasaisuus syntyvät liikenteen kulutuksesta, rakenteen deformaatiosta ja plastisesta deformaatiosta. On kuitenkin vaikeaa erotella kantavuuden heikkoudesta johtuvat deformaatiourat liikennemäärästä johtuvista kulutusurista tai raskaasta liikenteestä ja lämpötilasta johtuvasta plastisesta deformaatiosta (taulukko 2.1). Liikenteen kulutuksen aiheuttama urautuminen peittää huonosta kantavuudesta aiheutuvan urautumisen.

KVL ⇒ KANTAVUUS Tien kantavuus mitoitetaan kuormituskertaluvun mukaan	Rakenteen ⇒ deformaatio	URAT ja POIKITTAINEN EPÄTASAISUUS
KVL	Kulutusurat ⇒	
RASKAS LIIKENNE, LÄMPÖTILA	Plastinen ⇒ deformaatio	

Taulukko 2.1: Liikennemäärän (KVL=vuorokautinen liikennemäärä) vaikutus tien poikittaiseen epätasaisuuteen.

Myös tien pituusprofiilissa on epätasaisuutta. Pituussuuntainen epätasaisuus määritellään niin suureksi poikkeamaksi tien säännöllisestä yleistasosta (vertailutaso), että poikkeama vaikuttaa häiritsevästi

ajoon. Jos poikkeamat ovat niin pieniä, että ajoneuvon pyörät vaimentavat ne, eivätkä poikkeamat tunnu ajoneuvossa, on kyse päällysteen karkeudesta eikä tien epätasaisuudesta.

2.2.3 Vauriot

Halkeamat ovat yksittäisiä tien vaurioita, joiden aiheuttaja on lämpötilan tai kosteuden muutos. Halkeamatyypit ovat seuraavat: poikittain tien yli kulkevat poikittaishalkeamat, tien pituussuunnassa olevat pituushalkeamat sekä päällysteen pituussaumoissa olevat saumahalkeamat ja tien keskisaumassa esiintyvät keskisaumahalkeamat. Verkkohalkeamat ovat tien monikulmiomaisia repeämiä, joissa verkon silmäkoko on yleensä 5-30 cm, ja niitä esiintyy urassa, kaistan reunassa tai koko kaistalla.

Tien poikittaishalkeamien syy on pakkasen (nimitys pakkaskatko). Samoin saumahalkeamat johtuvat päällysteen kylmäkutistumisesta ja tietä päällystettäessä tehdystä huonosta saumatyöstä. Kova bitumilaji on kylmäkutistumiselle alttiimpi kuin pehmeä bitumilaji. Keskisaumahalkeamat syntyvät, kun tien lumeton keskikohta routii. Tien reunassa olevat pituushalkeamat voivat johtua tien jyrkästä reunasta. Vinot viivahalkeamat johtuvat epätasaisesta routimisesta esimerkiksi kallioleikkausten lähellä. Halkeamien haitta ajolle on vähäistä, mutta niiden kautta vesi pääsee tien rakenteeseen (Lehtipuu, 1983 s.367). Yksittäinen halkeama enteilee tiekerrosten väsymistä ja alkavaa verkkohalkeilua.

Verkkohalkeamat syntyvät tien rakenteiden pettäessä, jolloin sitomattomien kerrosten ja pohjamaan kantavuus heikkenee, ja näin asfaltin vetolujuutta rasitetaan. Silmäkooltaan 5-10 cm:n verkkohalkeamat aiheutuvat jakavan kerroksen (ylin sitomaton kerros) heikkoudesta. Tätä pienisilmäisempi hiusverkkohalkeilu ei johdu tien rakenteesta, vaan päällysteen kutistumisesta. Silmäkooltaan yli 30 cm:n verkkohalkeamat aiheutuvat alempien sitomattomien kerrosten ja alusrakenteen heikkoudesta. Verkkohalkeamat edistävät tien muuta vaurioitumista. Tie päällystetään uudelleen, jos liikennemäärästä riippuen 5-20 prosenttia tien pinnasta on verkkohalkeamilla (TVH, 1984 s.16-17). Koska verkkohalkeamilla oleva vilkkaasti liikennöity tie korjataan herkästi, verkkohalkeamia esiintyy etupäässä vanhoilla vähäliikenteisillä teillä (VTT, 1986 s.21).

Pakkanen aiheuttaa tielle routanousuja, purkaumia. Purkauma kehittyy jyrkkäreunaiseksi reiäksi kivirakeiden irrotessa tiestä kokonaisina, joten purkauma on kuopan esivaihe. Laaja asfaltissa oleva notkelma on toisenlainen purkauma, jossa päällysteen purkautuvasta pinnasta irtoa kiviainesta, ja päällyste voi kulua puhki. Tällaisen purkauman syynä olevan massan lajittumisen aiheuttaa sideaineksen vähyys, tien tyhjätila tai päällystevirhe. (Lehtipuu, 1983 s.366).

2.3. Vaurioitumisen mallitus

Tasaisuutta ja kulumiskestävyyttä pidetään tien tärkeimpinä ominaisuuksina. Kunnossa oleva tie on tasainen, ajettava tie, jossa ei ole uria eikä muita vaurioita. Tasaisuus kuvaa koko tien kuntoa, ja se on tien ominaisuus, johon vaikuttavat kaikki tien vauriot samanaikaisesti. Tasaisuus on tärkeä sekä tienkäyttäjälle että tienpitäjälle. Tienkäyttäjä kokee epätasaisen tien epäesteettisenä kokemuksena ja epämukavana ajona. Epätasaisuus lisää sekä ajoneuvojen että kuormien vahingoittumista ja lisää ajokustannuksia. Epätasaisuus vaikeuttaa tien ylläpitoa, se esimerkiksi haittaa tien pitämistä pintakuivana ja vaarantaa liikenneturvallisuutta. (Lehtipuu, 1983 s.222). Epätasaisuus antaa vihjeitä tien rakenteen huonosta kunnosta. Tien tasaisuudella vähennetään tien rakenteeseen tulevaa räsitusta. Tien tasaisuuden mittana käytetyt muuttujat (kuntoarvo, pituussuuntainen epätasaisuus ja vauriosumma ks. 2.4 ja 4.1) eivät täysin vastaa tasaisuuden yleiskunnon luonnetta.

Tien tasaisuus ja ajettavuus saadaan aikaan joko kevyemmillä tai raskaammilla kunnossapidon toimenpiteillä, jotka kohdistuvat pelkääseen tien pintaan (päällystys) tai tien rakenteeseen. Kumpikin alentaa tienkäyttäjän ajokustannuksia. Tienpitäjälle raskas toimenpide maksaa enemmän, mutta se pitää tien kunnossa kauemmin. Raskaassa toimenpiteessä lisätään tien rakenteiden kerrospaksuuksia, oiotaan tien suuntausta, lisätään kuivatusta ja kykyä vastustaa routaa jne. Ongelmana on valita tielle oikeita toimenpiteitä oikeaan aikaan.

Toimenpiteiden valinta tehdään ylläpidon ja kunnossapidon päätöksenteossa. Tässä vaiheessa hyödynnetään sekä tien nykyisiä kuntotietoja (nykytilajakaumaa) että mallitettua tien kuntoa ja eksogeenisiä muuttujia. Päätöksentekoprosessiin tarvitaan tietoa tien todellisesta kuntotilasta. Mitatuista tien kuntomuuttujista pitää selvittää tien kunnan todellinen tila, jotta rappeutumisen mallitus arvioi tien vaurioitumisen ja tulevan kuntokehityksen oikein. Vaurioitumisen malli on useammin

ennustemalli, joka ennustaa tien kunnan tulevan tilan, kuin kausaali-malli, jossa etsitään tien vaurioitumisen syitä. Ennustemallissa etsitään vaurioitumisen kanssa voimakkaasti korreloivia tekijöitä, jotka eivät välttämättä ole varsinaisia syitä vaurioitumiselle, vaan ne vaikuttavat tien kunnan kehitykseen ja vaurioprosessin jatkumiseen. Edelleen tehdyt kunnossapitotoimenpiteet vaikuttavat tien kuntoon ja kerättäviin kuntoaineistoihin. (Ben-Akiva, Ramaswamy, 1989 ja Ben-Akiva & ym., 1991).

Tienpidon päätöksenteon apuvälineenä on tietokoneohjelmia, tieverkon ylläpidon hallintajärjestelmiä (suppeassa merkityksessään PMS=Pavement Management System). Ensimmäiset ohjelmat sisälsivät vain tien rappeutumisen mallitusta, nykyiset ohjelmat sisältävät myös päätöksentekoprosessia ohjaavia osia kuten budjettiehtoja. HIPS-ohjelmalla tehdään tielaitoksella tieverkkotason tarkasteluja, joiden avulla etsitään optimaalista tiestön kuntotasoa (long-term) ja parhaita keinoja sen saavuttamiseksi (short-term) minimoimalla samalla sekä käyttäjän että tienpitäjän kustannuksia. PMS91 on hanketason järjestelmä, jolla tehdään kunnossapidon toimenpidesuunnittelua. Tiekohtaisten kuntotietojen avulla suunnitellaan kunnossapidon toimenpiteitä ja tutkitaan kunnostus- ja ylläpitoprojektien vaikutusta tiestön kokonaiskuntoon ja kustannuksiin. (Thompson & ym. ja Thompson, 1986).

2.4 Kuntoindeksit

Tien todellista kuntoa voidaan arvioida eri tavoin. Yksi tapa on määrittellä suoraan kuntomuuttujia, jotka arvioivat tien yleistä kuntoa (esimerkiksi PSR). Kuntomuuttujista voidaan laskea myös kuntoindeksejä, kuten summamuuttujat vauriosumma ja vaurioprosentti. Tien kuntotila voidaan käsittää myös HIPS-ohjelman tavalla, jossa tien kunto kuvataan neljän kuntomuuttujan luokiteltuina arvoina (kevätkantavuus, vauriosumma, IRI ja urasyvyys), jotka jakavat tiet 135:een eri kuntotilaan (TIEL, 1991e).

PSR (Present Serviceability Rating) on mittaaajan subjektiivinen näkemys tien kunnosta. Mittaaja arvioi tielle kuntoluokan yhdestä viiteen päällysteen vaurioiden, tien kuluneisuuden ja epätasaisuuden sekä roudasta ja kantavuudesta aiheutuneiden tien muodonmuutosten perusteella. Kuntoluokitusta on käytetty tielaitoksella yleensä vain sora- ja öljysorasteille (TVH 1986a, TVH 1986b). Välittömän korjauksen tarpeessa olevalle tielle annetaan kuntoarvo 1 ja hyvässä kunnossa

olevalle uudelle päällysteelle annetaan kuntoarvo 5. Kullekin kuntoarvolle on määritetty kunnostukseen tarvittavat toimenpiteet.

Tien yksittäisvaurioita kuvataan kahdella eri mittausmenetelmän tuottamalla kuntoindeksillä: vauriosummalla ja vaurioprocentilla. Vauriosumma on vaurioinventointimenetelmän tunnusluku ja vaurioprocentti syntyy vaurioarvioinnin tuloksena. Muuttujat on selostettu lähemmin luvussa 4. Vauriosumma lasketaan kaavalla

-vauriosumma = verkkohalkeamat+paikkaukset+reiät ja purkaumat+
0.4*poikittaishalkeamat+0.5*pituushalkeamat+0.1*saumahalkeamat,

jonka arvot vaihtelevat nolasta kahdeksaansataan sadan metrin tieosuudella (VTT, 1990b). Vaurioprocentti on painotettu keskiarvo kolmesta tärkeimmäksi katsotusta vauriomuuttujasta eli

-vaurioprocentti = 0.7*verkkohalkeamat+0.2*pituushalkeamat+0.1*paikkauspros.

Sen arvot vaihtelevat nolasta sataan prosenttiin.

Suomen ulkopuolella on käytössä muita kuntoindeksejä. Esimerkiksi PSI (Present Serviceability Index) määritellään kaavalla

-PSI=0.03-1.91*log(1+kaltevuusvarianssi)-1.38*urasyvyys²
-0.01*sqrt(halkeamat+paikkaukset),

joka on sovite lineaarisesta regressiosta, jossa PSR:ää selitetään kyseisillä tien vauriotiedoilla. PCI (Pavement Condition Index) koostuu 19:stä eri vauriotyypistä, jotka yhdistetään muuttujaksi, joka saa arvoja 0..100. Tätä indeksiä sovelletaan esimerkiksi PAVER -systeemissä, joka on käytössä USA:n osavaltioissa. Kanadalaiset indeksit VCI (Visual Condition Index), RCI (Roughness Condition Index) ja SAI (Structural Adequacy Index) ovat painotettuja funktioita tien vauriomuuttujista asteikolla 1..10. (Ramaswamy, McNeil, 1991). Ramaswamy ja McNeil (1991) kritisoivat kuntoindeksien suhteellisen vapaata käyttöä muissa tutkimuksissa ilman, että on paneuduttu mittausmenetelmien ja mittausolosuhteiden eroavuuksiin. Käyttäjät eivät tutustu myöskään riittävästi indeksien tilastollisiin heikkouksiin.

3 LISREL-MALLI

3.1 Yleistä

LISREL-mallissa tutkitaan havaittujen, mitattavissa olevien muuttujien latenttia struktuuria eli niiden taustalla vaikuttavia piilomuuttujia. LISREL-malli on lähtöisin faktorianalyysistä ja sen laajentamisesta yleiseksi kovarianssimatriiseja käsitteleväksi analyysiksi. Faktorianaalyysiä käytetään sosiaalitieteissä mm. sosiologiassa ja psykologiassa, kun mitataan esimerkiksi ihmisen älykkyyttä tai verbaalista lahjakkuutta. Tällöin tutkitaan asioita, joita ei pystytä mittaamaan suoraan.

Piilomuuttujan (älykkyys) vaikutus voidaan havaita indikaattorimuuttujien avulla (useat testit, joissa testataan esimerkiksi verbaalista ja matemaattista taitoa). Havaitut muuttujat toimivat indikaattoreina taustalla vaikuttavalle ilmiölle, vaikka niiden arvot ovatkin arvioita todellisen muuttujan arvolle. Faktorianaalyysi ottaa huomioon mittausvirheen, kun kiinnostuksen kohteena olevaa latenttia ilmiötä ei pystytä mittaamaan tarkasti johtuen esimerkiksi otannasta tai kun muuttujat eivät suoraan kuvaa mitattavaa kohdetta.

Faktorimalli on kehittynyt itsenäisesti, mutta se on myöhemmin liitetty myös osaksi LISREL-mallien teoriaa konfirmatorisen faktorianaalyysin avulla. LISREL-mallissa tutkitaan lisäksi kahden faktorimallin riippuvuussuhteita. Yhtälöiden (3.1)-(3.3) LISREL-mallin puitteissa voidaan rakentaa erilaisia latentin struktuurin malleja, joita ovat klassinen faktorianaalyysi (luku 3.3.1), ensimmäisen ja toisen kertaluvun konfirmatorinen faktorianaalyysi (luvut 3.3.2 ja 3.3.4), simplex-malli, LISREL-rakennemalli ja muut latentin struktuurin mallit.

3.1.1 Oletukset

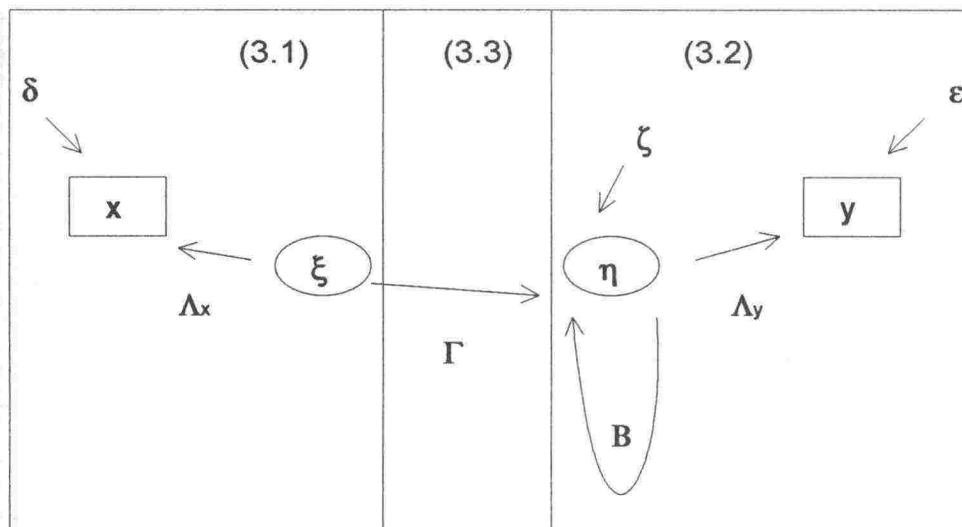
LISREL-malli kuvataan yhtälöillä

$$\mathbf{x} = \Lambda_x \boldsymbol{\xi} + \boldsymbol{\delta} \quad (3.1)$$

$$\mathbf{y} = \Lambda_y \boldsymbol{\eta} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (3.2)$$

$$\boldsymbol{\eta} = \mathbf{B}\boldsymbol{\eta} + \Gamma\boldsymbol{\xi} + \boldsymbol{\zeta} . \quad (3.3)$$

Yhtälöt (3.1) ja (3.2) ovat mittausmalleja, joiden keskinäistä rakennetta kuvataan rakenneyhtälöllä (3.3). Rakenneyhtälö mallittaa kaksi latenttia struktuuria yhdistäen $\boldsymbol{\eta}$ ja $\boldsymbol{\xi}$ -faktorit. Kuvassa 3.1 yhtälöt esitetään graafisesti.



Kuva 3.1: LISREL-malli vuokaaviona.

Yhtälössä (3.1) $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_q)'$ on vektori havaituista muuttujista, joiden yhtälön (3.4) mukaista kovarianssirakennetta Σ_{xx} tutkitaan. Muuttujien riippuvuus faktoreista kuvataan latauksilla λ_{ij} , $i=1, \dots, q$, $j=1, \dots, n$, $n < q$, joista matriisi Λ_x ($q \times n$) koostuu. Faktorilataukset kertovat, kuinka paljon kukin mitattu muuttuja vastaa $\xi = (\xi_1, \dots, \xi_n)'$ -faktoreiden kovarianssista tai toisaalta miten faktorit vaikuttavat \mathbf{x} -muuttujiin. Faktoreiden ξ kovarianssit ovat matriisissa $\text{cov}(\xi) = \Phi$ ($n \times n$). Mallin mittausvirhettä kuvaa vektori $\delta = (\delta_1, \dots, \delta_q)'$, jonka kovarianssmatriisi $\text{cov}(\delta) = \Theta_\delta$ ($q \times q$) sisältää alkioita $\theta_{ij}^{(\delta)}$, $i, j=1, \dots, q$.

Sisällöllisesti ja rakenteellisesti samanlaiset yhtälöt (3.1) ja (3.2) on eroteltu merkinnöiltään. Yhtälössä (3.2) $\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_p)'$ on vektori havaituista muuttujista, joiden kovarianssirakenne ilmaistaan faktoreiden $\eta = (\eta_1, \dots, \eta_m)'$ avulla ($m < p$). Matriisi Λ_y ($p \times m$) koostuu \mathbf{y} -muuttujien ja η -faktoreiden välisistä latauksista. Matriisissa $\Omega = \text{cov}(\eta)$ ($m \times m$) on η -faktoreiden kovarianssit. Kovarianssirakenteen mallitukessa syntyvä virhe on vektorissa $\varepsilon = (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_p)'$, ja niiden kovarianssmatriisi $\text{cov}(\varepsilon) = \Theta_\varepsilon$ ($p \times p$) sisältää alkioita $\theta_{ij}^{(\varepsilon)}$, $i, j=1, \dots, p$.

Rakenneparametrimatriisin Γ ($m \times n$) lataukset yhtälössä (3.3) kuvaavat, miten ξ -faktori vaikuttaa η -faktoreihin. Rakenneparametrimatriisilla B ($m \times m$) kuvataan η -faktoreiden keskinäiset vaikutukset. Mallissa on aina $\text{diag}(B)=0$ ja $(I-B)$ on kääntävä (ei-singulaarinen) matriisi, eli $(I-B)^{-1}$ on olemassa. Vektori $\zeta = (\zeta_1, \dots, \zeta_m)'$ sisältää rakenneyhtälön virheet, joiden kovarianssimatriisina on $\text{cov}(\zeta) = \Psi$ ($m \times m$).

Yhtälöiden yksinkertaistamiseksi oletetaan, että odotusarvot ovat nollija eli $E(\mathbf{x})=0$, $E(\mathbf{y})=0$, $E(\xi)=0$, $E(\eta)=0$, $E(\zeta)=0$, $E(\delta)=0$ ja $E(\varepsilon)=0$,

koska malleilla tutkitaan yleensä vain muuttujien välisiä kovariansseja. Joissakin mallityypeissä odotusarvoja ei oleteta nolliksi, kun tarkastellaan keskiarvojen eroja.

Yhtälöissä (3.1) ja (3.2) oletetaan, että virhetermit ja faktorit eivät korreloi keskenään eli $E(\xi\delta')=0$ ja $E(\eta\epsilon')=0$. Samoin eri yhtälöiden mittausvirheet ja faktorit ovat korreloimattomia keskenään, eli $E(\xi\epsilon')=0$ ja $E(\eta\delta')=0$. Myöskään rakenneyhtälön (3.3) ζ -virhetermit eivät korreloi ξ -faktoreiden kanssa, eli $E(\xi\zeta')=0$, eivätkä keskenään, eli $E(\delta\epsilon')=0$, $E(\delta\zeta')=0$ ja $E(\epsilon\zeta')=0$.

3.1.2 Mallin ratkaisu

LISREL-mallissa oletetaan yleensä, että muuttujat \mathbf{x} ja \mathbf{y} noudattavat multinormaalijakaumaa. Merkitään jatkossa vektoria $\mathbf{z} = (\mathbf{x}, \mathbf{y})' = (x_1, \dots, x_q, y_1, \dots, y_p)' = (z_1, \dots, z_k)'$, $k=p+q$. Olkoon k -ulotteisen multinormaalijakautuneen satunnaisvektorin \mathbf{z} odotusarvo $E(\mathbf{z})=\boldsymbol{\mu}=0$, kovarianssimatriisi $\text{cov}(\mathbf{z})=E(\mathbf{z}-\boldsymbol{\mu})(\mathbf{z}-\boldsymbol{\mu})'=\boldsymbol{\Sigma}$ ja

$$\mathbf{z} \sim N_k(0, \boldsymbol{\Sigma}), \quad (3.4)$$

jossa $|\boldsymbol{\Sigma}|>0$ eli $\boldsymbol{\Sigma}$ on positiivisesti definiitti ja $\boldsymbol{\Sigma}^{-1}$ on olemassa. Vektorin \mathbf{z} kovarianssimatriisi $\boldsymbol{\Sigma}$ voidaan osittaa seuraavasti:

$$\boldsymbol{\Sigma} = E \begin{bmatrix} \mathbf{xx}' & \mathbf{yx}' \\ \mathbf{xy}' & \mathbf{yy}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Sigma}_{xx} & \boldsymbol{\Sigma}_{yx} \\ \boldsymbol{\Sigma}_{xy} & \boldsymbol{\Sigma}_{yy} \end{bmatrix}. \quad (3.5)$$

Kovarianssimatriisin $\boldsymbol{\Sigma}$ tyhjentävä tunnusluku on N -alkioisen satunnaisotoksen otoskovarianssimatriisi \mathbf{S} , joka ositetaan kuten (3.5)

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} s_{11} & \dots & s_{1k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{1k} & \dots & s_{kk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{xx} & \mathbf{S}_{xy} \\ \mathbf{S}_{yx} & \mathbf{S}_{yy} \end{bmatrix}, \quad (3.6)$$

jossa $s_{ij} = [1/(N-1)]\sum_h (z_{hi}-\bar{z}_i)(z_{hj}-\bar{z}_j)$, ja otoskeskiarvo on $\bar{z}_i = \sum_h z_{hi}/N$, $i=1, \dots, k$.

Kovarianssimatriisin laskennassa on suositeltavampaa käyttää kaikkien muuttujien yhtäaikaista ei-puuttuvia havaintoja (listwise-menettely) kuin laskea kukin s_{ij} vain muuttujien z_i ja z_j yhtäaikaisten ei-puuttuvien havaintojen perusteella (pairwise). Kovarianssimatriisin sijasta voidaan analysoida korrelaatiomatriisia \mathbf{R} , joka koostuu alkioista

$$r_{ij} = s_{ij} / \sqrt{s_{ii}s_{jj}}$$

Korrelaatiomatriisia käytetään, jos tutkittavien muuttujien vaihteluaueet ovat erilaisia. Korrelaatiomatriisin käyttö on ongelmallista, koska se tuottaa virheellisiä parametriestimaattien virhevariansseja. Samoin korrelaatiomatriisin käyttö ei ole suotavaa mallissa, jossa on rajoitettuna estimoituja parametreja. (Jöreskog, Sörbom, 1989 s.31).

LISREL-mallin teoriaa on laajennettu jatkuvien muuttujien (vähintään välimatka-asteikko) analyysistä järjestysasteikollisten muuttujien käsittelyyn. Kahden diskreetin muuttujan välinen korrelaatio lasketaan polykoorisena korrelaationa, ja diskreetin ja jatkuvan muuttujan välinen korrelaatio lasketaan polyseriaalisena korrelaationa, joita voidaan laskea esimerkiksi Prelis-ohjelmalla. Järjestyslukumuuttujan x taustalla ajatellaan olevan jatkuvan muuttujan x^* , joka havaitaan luokiteltuna k :hon eri luokkaan: $x^* < \alpha_1$, $\alpha_1 < x^* < \alpha_2$, $\alpha_2 < x^* < \alpha_3$, ..., $\alpha_k < x^*$. Polykooriset ja polyseriaaliset korrelaatiot lasketaan teoreettisina korrelaatioina kaksikulotteisista normaali jakaumista suurimman uskottavuuden menetelmällä (Olsson, 1979).

LISREL-mallin ratkaisulla tarkoitetaan vektorin z kovarianssimatriisin Σ esittämistä yhtälöiden (3.1)-(3.3) parametrien avulla. Yhtälön (3.5) osamatriiseja käyttäen saadaan (liite 1) seuraavat kovarianssimatriisit:

$$\begin{bmatrix} \Sigma_{xx} & \Sigma_{yx} \\ \Sigma_{xy} & \Sigma_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Lambda_x \Phi \Lambda_x' + \Theta_\delta & \Lambda_y (I-B)^{-1} \Gamma \Phi \Lambda_x' \\ \Lambda_x \Phi \Gamma' (I-B')^{-1} \Lambda_y' & \Lambda_y (I-B)^{-1} (\Gamma \Phi \Gamma' + \Psi) (I-B')^{-1} \Lambda_y' + \Theta_\epsilon \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

3.1.3 Mittausvirhe

Yhtälön (3.2) η -faktoreita kutsutaan yleisfaktoreiksi (common factors) ja ϵ -virhetermejä ominaisfaktoreiksi (unique factors). Ominaisfaktori on osa alkuperäisten muuttujien vaihtelusta, joka ei aiheudu faktoreista. Ominaisfaktori voidaan jakaa kahteen korreloimattomaan osaan: spesififaktoriin η_{si} (specific factor) ja mittausvirheeseen e_i (measurement error)

$$\epsilon_i = \eta_{si} + e_i, \quad i=1, \dots, p.$$

Virhetermin jakoa ylläolevalla tavalla ei voida useinkaan tehdä käytännössä. Malleissa virhetermit ϵ_i oletetaan keskenään korreloimattomiksi, toisin sanoen niiden kovarianssimatriisi Θ_ϵ oletetaan diagonaaliseksi. Jos kovarianssimatriisi ei ole diagonaalinen, on korrelaatio oletettavasti seuraus spesififaktorin olemassaolosta.

Esimerkiksi konfirmatorisessa faktorimallissa voidaan luopua Θ_{ϵ} :n diagonaalisuudesta, mikä indikoi jonkinlaisten spesififaktoreiden olemassaoloa. Tällöin virhetermi ϵ ei ole enää pelkkä mittausvirhe, vaan on olemassa systemaattista virhettä, jota voidaan tutkia. Yleensä LISREL-mallissa virheiden δ ja ϵ oletetaan kuitenkin syntyneen mittausvirheenä. Jos virheet ovat isoja, ovat niitä vastaat muuttujat epäluotettavia, eivätkä ne mittaa hyvin faktoria (muuttujan reliabiliteetti ks. 3.2.5.2). Edellä oleva pätee myös yhtälön (3.2) ξ -faktoriin ja δ -virheelle. (Leskinen, 1989).

3.2 Mallin rakentaminen

LISREL-mallin rakentaminen koostuu mallin spesifioinnista, mallin identifioituvuustarkasteluista, mallin estimoinnista, hypoteesien testauksesta ja riittävyystarkasteluista. Mallin rakentaminen tehdään edellä luetellussa järjestyksessä, mutta mallin rakentamisessa palataan edeltäviin vaiheisiin, useimmiten spesifiointiin asti, kun jossakin osavaiheessa ei pystytä etenemään.

3.2.1 Spesifiointi

Spesifiointi eli mallin täsmäntäminen on sopivan LISREL-mallin valintaa yhtälöistä (3.1)-(3.3). Mallitettavasta ilmiöstä olevan ennakkotiedon ja alustavien tutkimushypoteesien perusteella valitaan sopiva tilastollinen malli. Kun tutkittavasta asiasta on aikaisempia tutkimuksia tai tarpeeksi vahvaa ennakkotietoa, voidaan sen perusteella rajata mallien joukkoa. Analyysiä tehdäänkin tällöin usein ennakkokäsitysten varmistamiseksi, mistä johtuu nimitys konfirmatorinen tutkimuksen lähestymistapa. Ennakkotiedon puuttumisen tai olemassaolon perusteella erotellaan kaksi erilaista tutkimustapaa: konfirmatorinen ja eksploratiivinen (uusia asioita kokeileva). Erottelu tällä tavalla tapahtuu esimerkiksi klassisen ja konfirmatorisen faktorianalyysin välillä (ks. 3.3).

Valittu malli täsmennetään parametrikohteisesti. Mallissa parametri on joko kiinnitetty, rajoitettu tai vapaa. Kiinnitetylle parametrille annetaan jokin reaalin vakioarvo. Vakioarvo on yleensä nolla tai ykkönen. Rajoitettu parametri estimoidaan yhtäsuurena yhden tai useamman muun parametrin kanssa. Vapaa parametri estimoidaan ilman rajoitteita. Parametrin kiinnityksen oikeellisuutta testataan mallin riittävyystarkasteluissa (ks. 3.2.4), ja tarvittaessa muutetaan paramet-

rien kiinnityksiä. Kaikkia parametreja matriiseissa Λ_x , Φ , Θ_e , Λ_y , Θ_δ , Γ , B ja Ψ voidaan täsmentää.

Parametrien kiinnittämällä tehdään faktoreista skaalayksikäsitteisiä. Koska faktoreita η ja ξ ei voida havaita, niiden origon sijaintia ja mittayksikköä ei tiedetä. Faktoreiden origo eli odotusarvo oletetaan jo LISREL-mallin teoriaoletuksissa nollassi. Jos faktoreiden mittayksikköä ei kiinnitettäisi, useat mallit tuottaisivat saman kovarianssimatriisin Σ . (Leskinen, 1987 s.14 - 15). Skaalayksikäsitteisyys tehdään joko kiinnittämällä Λ_y :n kultakin sarakkeelta yksi lataus nolasta poikkeavaksi (etukäteistiedon perusteella faktoria parhaiten kuvaavan muuttujan lataus) tai kiinnittämällä ξ -faktoreiden varianssit ykköseksi $\text{diag}(\Phi)=I$. Latauksen kiinnityksellä saadaan faktorin mittayksiköksi sama kuin sen muuttujan, jonka lataus kiinnitettiin.

3.2.2 Identifioituvuus

Toinen parametrin kiinnittämisen tarkoitus on tuottaa identifioituva malli. Identifioituvuudella varmistetaan, että parametri on estimoitavissa yksikäsitteisenä mallista. Mallin parametrisoinnista lasketun kovarianssimatriisin (yhtälö 3.7) tulee vastata yksikäsitteisesti vain yhtä mallia. Identifioituvuuden perusteella voidaan erotella ali- ja yli-identifioituvat sekä identifioituvat mallit. Mallia kutsutaan yli-identifioituvaksi, jos yhtälöryhmässä (3.7) on yksikäsitteisiä yhtälöitä enemmän kuin tarvitaan parametrien estimoimiseksi, ja ali-identifioituvaksi, jos estimoitavia parametreja on enemmän kuin yhtälöitä. Ali-identifioituvat parametrit eivät ole yksikäsitteisiä, joten mallin vapautta rajoitetaan kiinnittämällä latauksia, asettamalla niitä yhtäsuuriksi ja(tai) asettamalla faktoreiden variansseja ykkösiksi. Etsittäessä lähintä identifioituvaa mallia, voidaan toisinaan hyödyntää ali-identifioituvien parametrien summan tai tulon identifioituvuutta. (Everitt, 1984 s.37).

Leskinen (1987) määrittelee identifioituvuuden ekvivalenttien mallien avulla. Jos mallin eri parametrisoinnit tuottavat saman kovarianssimatriisin Σ , ovat mallit ekvivalentteja. Jos yksittäisen parametrin arvo on sama kaikissa ekvivalenteissa rakenteissa, parametri on identifioituva (sallitaan faktoreiden etumerkin ja järjestyksen muutos). Jöreskog (1981) määrittelee yksittäisen parametrin identifioituvaksi, jos parametri on ratkaistavissa yhtälöstä (3.7) ja LISREL-mallin identifioituvaksi, jos sen jokainen parametri on identifioituva.

Mallin identifioituvuus on tarkistettavissa varmimmin, tosin työläimmin, ratkaisemalla mallin parametrit yhtälöstä (3.7). Parametrien määrän kasvaessa yhtälöiden määrä kuitenkin kasvaa ja yhtälöt monimutkaistuvat. Lisäksi ne ovat usein epälineaarisia (Everitt, 1984 s.37). Liitteessä 2 on tarkasteltu tämän tutkimuksen faktorimallin toisen kertaluvun faktoreiden identifioituvuutta. Estimoinnin yhteydessä voidaan modifikaatioindeksien avulla tutkia parametrin alidentifioituvuutta (ks. 3.2.4). Mallin identifioituvuutta voidaan tutkia myös mallin estimoinnissa kohdefunktion F (ks. 3.2.3) toisten derivaattojen matriisiin avulla. Jos matriisi on positiivisesti definiitti, malli on identifioituva (Everitt, 1984 s.37).

3.2.3 Estimointi

Mallin estimoinnissa lasketaan mallin matriiseissa Λ_x , Φ , Θ_e , Λ_y , Θ_δ , Γ , B ja Ψ oleville vapaille ja rajoitetuille parametreille estimaatit. LISREL-mallin (3.1)-(3.3) jokainen parametrirakenne tuottaa jonkin teoreettisen kovarianssimatriisin kaavan (3.7) mukaan.

Malli estimoidaan etsimällä minimiä kohdefunktiolle, jossa on ilmaistuna ero Σ :n ja otoskovarianssimatriisin S välillä. Estimointimenetelmissä etsitään minimi painotetulle neliösumman lausekkeelle, eli kohdefunktiona on

$$P=(p-p)'W^{-1}(p-p), \quad (3.8)$$

jossa $p = (s_{11}, s_{21}, s_{31}, \dots, s_{kk})'$ on vektori kaikista matriisin S alkioista. Samoin $p = (\sigma_{11}, \sigma_{21}, \sigma_{31}, \dots, \sigma_{kk})'$ on vektori kovarianssimatriisin alkioista. Painomatriisin W valintaan vaikuttaa muuttujien jakaumaoletus, joka puolestaan vaikuttaa parametriestimaattien tilastollisiin ominaisuuksiin.

Estimointimenetelmiä ovat suurimman uskottavuuden menetelmä (ML=Maximum Likelihood), pienimmän neliösumman menetelmä (OLS=Ordinary Least Squares) ja yleistetyn pienimmän neliösumman menetelmä (GLS=Generalized Least Squares). Lisäksi alkuestimaattien etsintään on kaksivaiheinen (TSLS=Two Stage Least Squares) pienimmän neliösumman menetelmä ja instrumenttimuuttujiin (IV=Instrumental Variables) perustuva estimointimenetelmä. (Jöreskog, Sörbom, 1989 s.16).

Suurimman uskottavuuden estimointimenetelmä perustuu normaali-jakautuneen N -alkioisen otoksen uskottavuusfunktion logaritmin eli

$$\begin{aligned} \ln L(\mu, \Sigma; z_1, \dots, z_N) &= \\ \ln \prod_j f(z_j; \mu, \Sigma) &= \\ -[kN/2] \ln(2\pi) - (N/2) \ln |\Sigma| - \frac{1}{2} \sum_k (z_k - \mu)' \Sigma^{-1} (z_k - \mu) \end{aligned}$$

lausekkeeseen, jossa $\mu = E(z)$ ja Σ tulkitaan estimoitavan kovarianssi-parametrin funktioksi. Tämä menetelmä vastaa kohdefunktion

$$F = \ln |\Sigma| + \text{tr}(\mathbf{S} \Sigma^{-1}) - \ln |\mathbf{S}| - k \quad (3.9)$$

minimointia vapaiden ja rajoitettujen parametrien suhteen (Lawley, Maxwell, 1971 s.26). Minimointi edellyttää, että \mathbf{S} ja Σ ovat positiivisesti definiittejä. ML-estimoinnissa saatavat estimaatit ovat oikein spesifioituille malleille tarkentuvia minimivarianssiestimaatteja ja asymptoottisesti normaalijakautuneita (Bartholomew, 1987). Myös log-normaalisen jakauman tapauksessa estimaatit ovat tarkentuvia.

Kaikki menetelmät ovat erikoistapauksia painotetusta pienimmän neliösumman menetelmästä (WLS). Menetelmä sopii erityisesti tilanteisiin, joissa havaituille muuttujille ei voida olettaa multinormaalijakaumaa. Jakauman tulee olla kuvattavissa ensimmäisten ja toisten momenttien avulla, jolloin korkeammat momentit eivät sisällä enää tietoa jakaumasta. (Jöreskog, Sörbom, 1989 s.21). Tällöin saadaan asymptoottisesti oikeat χ^2 -testisuureet ja oikeat virhevarianssit.

Kaikki edellä mainitut menetelmät tuottavat tarkentuvia estimaatteja. Lisäoletus normaalijakaumasta tarvitaan, jos parametriestimaattien varianssit halutaan tarkentuviksi. GLS- ja ML -estimaatit ovat oikein spesifioituille ja identifioituville malleille asymptoottisesti ekvivalentteja. ML- ja GLS-menetelmät ovat robusteja muuttujien eroavuudelle normaalijakaumasta. Kuitenkin jakauman poiketessa paljon normaalijakaumasta, on parempi käyttää WLS-menetelmää. (Jöreskog, Sörbom, 1989 s.20).

Kohdefunktion (3.9) minimoinnissa (paitsi TSLS- ja IV-menetelmissä) käytetään iteratiivisia laskentaproseduureja, kuten Fletcher-Powell- ja Newton-Raphson-menetelmää (Lawley, Maxwell, 1971 s. 138 - 146). Jos aineistossa on vähän havaintoja, paljon puuttuvia havaintoja tai lineaarisesti riippuvia muuttujia, saattaa otoksesta laskettu otoskovarianssimatriisi \mathbf{S} olla ei-positiivisesti definiitti, jolloin laskenta ei onnistu (Leskinen, 1989 s.108). Kohdefunktiosta laskettu minimi voi olla lokaalinen eikä globaalinen, jos havaintojen jakauma poikkeaa paljon normaalijakaumasta. Myös identifioitumattomalle ja väärin

spesifioidulle mallille voidaan saada kelvottomia estimaatteja (Leskinen, 1989 s.131).

3.2.4 Hypoteesien testaus

Hypoteesien testaus jaotellaan χ^2 -yhteensopivuustestiin ja χ^2 -peräkäistestiin riippuen siitä, verrataanko pelkästään yhden mallin hyvyyttä eli sopivuutta aineistoon vai verrataanko kahden mallin välistä paremmuutta.

Mallin yhteensopivuutta aineiston kanssa testataan χ^2 -yhteensopivuustestillä, joka perustuu havaintojen normaalijakaumaoletukselle. Testissä verrataan LISREL-mallin parametrisointia H_0 (vapausasteilla t_0) täysin rajoittamattomaan malliin H_1 (vapausasteilla $\frac{1}{2}k(k+1)$). Testattavat hypoteesit ovat siis seuraavat:

H_0 : Σ toteuttaa mallin rajoitukset

H_1 : Σ :ssa ei ole rajoituksia.

Oletetaan $\mathbf{z} \sim N_k(\mathbf{0}, \Sigma)$, jolloin uskottavuussuhteen testi

$$\lambda = \max L(H_0) / \max L(H_1)$$

on uskottavuusfunktion maksimiarvojen suhde nollahypoteesin ja vastahypoteesin voimassa ollessa. Olkoon $\hat{\Sigma}$ Σ :n ML-estimaatti H_0 :n voimassa ollessa. Koska Σ :n ML-estimaatti H_1 :n voimassa ollessa on \mathbf{S} , on logaritmoiduksi uskottavuusfunktioiksi johdettavissa (Leskinen, 1987 s.92) lauseke,

$$\begin{aligned} \ln L &= -[(N-1)/2][\ln |\hat{\Sigma}| + \text{tr}(\hat{\Sigma}^{-1}\mathbf{S})] \text{ ja edelleen} \\ -2\ln \lambda &= (N-1)[\ln |\hat{\Sigma}| + \text{tr}(\hat{\Sigma}^{-1}\mathbf{S}) - \ln |\mathbf{S}| - k], \end{aligned} \quad (3.10)$$

joka noudattaa χ^2 -jakaumaa vapausasteilla $t = \frac{1}{2}k(k+1) - t_0$, joka on hypoteesien mukaisten mallien estimoitavien parametrien lukumäärien erotus. (Leskinen, 1987 s.92.) Jos testisuure saa suuria arvoja vapausasteisiinsa nähden ($E(\chi^2) = \text{vapausasteet}$), hylätään nollahypoteesin määrittelemä malli. χ^2 -testi vaatii riittävän otoskoon, mutta suurilla otoksilla ($N > 500$) malli hylkääntyy käytännön kannalta kuitenkin helposti. (Leskinen, 1987 s.122.) Testisuure voidaan estimoida ML-menetelmän lisäksi GLS- ja WLS-menetelmillä. GLS- ja ML-menetelmissä oletetaan muuttujien multinormaalijakautuneisuus ja WLS:ssä tarvitaan tarkentuva painomatriisi \mathbf{W} . (Jöreskog, Sörbom, 1989 s. 245.)

Kahden mallin välistä paremmuutta vertaillaan χ^2 -peräkkäistestillä. Testauksessa tutkitaan sisäkkäisiä malleja, joissa täsmennetään H_1 :n määrittämien mallien joukkoa, $H_0 \subset H_1$. Hypoteesin H_1 alkupe-
räistä mallia täsmennetään esimerkiksi uusilla parametrien kiinnityk-
sillä. Nollahypoteesi ja vastahypoteesi asetetaan siis seuraavasti:

H_0 : malli M_0 on oikea

H_1 : malli M_1 on oikea.

χ^2 -peräkkäistestissä lasketaan sekä H_0 ja H_1 :n mukaisille malleille χ^2 -yhteensopivuustestit. Malleista valitaan se, jonka χ^2 -testiarvo on pieni vapausasteisiinsa nähden. Vaihtoehtoisesti valitaan hypoteesin H_1 mukainen malli, jos testisuure

$$D^2 = \chi^2_t - \chi^2_u \sim \chi^2_{t-u},$$

jossa $t-u$ on erotus vapausasteissa, joutuu hylkääntymisalueelle. Kummankin mallin tulee olla tulkinnallisesti mielekäs.

3.2.5 Riittävyystarkastelut

Riittävyystarkasteluissa tutkitaan mallin sopivuus aineistoon. Riittä-
vyystarkasteluilla saadaan ideoita mallin rakentamiseen, jolloin malli
spesifioidaan uudelleen ja tehdään mallin identifioituvuustarkastelut
ja estimointi. Mallin spesifikaatiota tarkennetaan, kunnes riittävyystar-
kastelujen perusteella malli sopii aineistoon ja malli on järkevä sekä
tilastollisesti että tulkinnallisesti. Testisuureet jaotellaan koko mallin
yleistä sopivuutta aineistoon testaaviin testeihin sekä muuttujien,
havaintojen ja parametrien sopivuutta testaaviin testeihin. Koska
koko mallia koskevat riittävyysmitat eivät osoita, miltä osin malli ei
sovi aineistoon, tarvitaan muita testejä kertomaan, miltä osin mallin
rakenne on sopimaton aineistoon.

Koko mallia koskevat riittävyystarkastelut

χ^2 -testi mittaa mallin yhteensopivuutta aineiston kanssa. Koska testi
on kuitenkin riippuvainen otoskoosta, tulisi sitä käyttää vain kahden
sisäkkäisen mallin välisen paremmuuden vertailuun (ks. luku 3.2.4).
Yhteensopivuuden tutkimisessa tulisi käyttää sen sijaan yhteensopi-
vuusindeksejä ja keskimääräistä jäännösvarianssia.

Normeerattu yhteensopivuusindeksi Δ_{01} mittaa χ^2 -testisuureen tavoin
mallin yleistä sopivuutta aineistoon. Indeksiksi

$$\Delta_{01} = [\chi^2_0 - \chi^2_1] / \chi^2_0$$

on riippumaton otoskoosta N . Kaavassa χ^2_0 on χ^2 -yhteensopivuustestin arvo hypoteettiselle mallille, joka ei selitä lainkaan havaittujen muuttujien korrelaatioita. Esimerkki tällaisesta mallista on $y=e$, jolloin $\Sigma_{yy}=\Theta_e$. χ^2_1 on testattavan mallin χ^2 -yhteensopivuustestin arvo. As-teikkona yhteensopivuusindeksillä on $0 < \Delta_{01} < 1$. Arvon tulisi olla vähintään 0.90. (Leskinen, 1987 s.124).

Yhteensopivuusindeksi (=Goodness of Fit Index) määritellään ML-estimoinnissa kaavalla

$$GFI = 1 - [\text{tr}(\hat{\Sigma}^{-1}S - I)^2 / \text{tr}(\hat{\Sigma}^{-1}S)^2].$$

Yhteensopivuusindeksi saa arvoja väliltä $0 < GFI \leq 1$, mutta arvon tulisi olla vähintään 0.90, jotta mallin ja aineiston yhteensopivuutta voidaan pitää riittävänä. Jos $\hat{\Sigma}=S$, niin $GFI=1$. (Leskinen, 1987 s.128). Vastaava vapausasteilla korjattu yhteensopivuusindeksi (=Adjusted Goodness of Fit Index) lasketaan kaavalla

$$AGFI = [1 - k(k+1)] / [2t(1 - GFI)],$$

jossa t on mallin vapausasteiden lukumäärä (Jöreskog, Sörbom, 1989 s.27).

Keskimääräinen jäännösvarianssi (=Root Mean square Residual) määritellään kaavalla

$$RMR = \sqrt{[2 \sum_i \sum_j (s_{ij} - \hat{\sigma}_{ij})^2 / k(k+1)]},$$

ja sillä testataan mallin sovitteen $\hat{\Sigma}$ eroa otoskovarianssimatriisiin S . Esimerkiksi RMR:n arvo 0.05 osoittaa, että muuttujien otoskovarianssista on jäänyt selittämättä viisi prosenttia. (Leskinen, 1987 s.129).

Muuttujakohtaiset testit

Determinaatiokerroin (yleisreliabiliteetti) mittaa muuttujien yhtäaikaista sopivuutta malliin. Mallin (3.2) tapauksessa se määritellään kaavalla

$$D_y = 1 - |\Theta_e| / |\Sigma_{yy}|,$$

jossa matriisien Θ_e ja Σ_{yy} determinantit ovat mittausvirheiden ja havaintojen nk. yleistettyjä variansseja. Laskennassa Θ_e korvataan estimaatillaan ja Σ_{yy} otoskovarianssimatriisilla S_{yy} . Lähellä ykköstä olevat arvot osoittavat mallin riittävyys. Samoin lasketaan yhtälön (3.1) osamallille kerroin D_x . (Leskinen, 1987 s.130).

Mallissa (3.2) lasketaan kullekin muuttujalle determinatiokerroin, joka mittaa kuinka hyvin muuttuja sopii malliin ja kuinka hyvä faktorin mittaussväline muuttuja on. Determinatiokerroin

$$R_i^2 = 1 - \theta_i / \sigma_i, \quad i=1, \dots, p$$

on muuttujan reliabiliteettikerroin (ks. 3.1.3), jonka lähellä ykköstä oleva arvo osoittaa muuttujan olevan faktorin hyvä kuvaaja. Kertoimen laskennassa θ_i korvataan estimaatillaan ja σ_i otoskovarianssilla s_{ii} . (Leskinen, 1987 s.129). Toisen kertaluvun konfirmatorisessa faktorimallissa voidaan tutkia ensimmäisen kertaluvun faktoreiden selityskykyä toisen kertaluvun faktoreihin nähden suureella

$$R_{\eta(i)}^2 = 1 - \psi_i / \text{var}(\eta_i), \quad i=1, \dots, m$$

(Leskinen, 1987 s.169).

Havaintojen sopivuus mallin kanssa

Malliin sopimattomat kovarianssit etsitään tutkimalla otoskovarianssimatriisin ja mallin antaman sovitekovarianssimatriisin välistä eroa $S - \hat{\Sigma}$. Koska asympotoottisesti $E(s_{ij}) = \sigma_{ij}$ ja $\text{var}(s_{ij}) = (\sigma_{ii}\sigma_{jj} + \sigma_{ij}^2)/N$, $i, j = 1, \dots, p$, niin oikein spesifioidulle mallille on normalisoitu residuaali

$$NR_{ij} = (s_{ij} - \hat{\sigma}_{ij}) / \sqrt{(\hat{\sigma}_{ii}\hat{\sigma}_{jj} + \hat{\sigma}_{ij}^2)/N}$$

itseisarvoltaan alle 1.96:n viiden prosentin merkitsevyystasolla. Suurempi testisuureen arvo osoittaa muuttujien y_i ja y_j välisen kovarianssin sopimattomuutta mallirakenteeseen. (Leskinen, 1987 s.133)

Parametriskohtaiset tarkastelut

Parametrien keskivirheillä arvioidaan estimointitarkkuutta ja nollasta eroavuutta (tilastollista merkitsevyyttä) testillä

$$t\text{-arvo} = \text{parametrin estimaatti} / \text{keskivirhe}.$$

Arvon perusteella parametri tulkitaan nolaksi viiden prosentin merkitsevyystasolla, kun $|t\text{-arvo}| < 1.96$. Parametrin 95 %-luottamusväli saadaan kaavalla

$$\text{parametrin estimaatti} \pm 1.96 * \text{keskivirhe}.$$

Se sisältää tuntemattoman parametrin 95% todennäköisyydellä. (Leskinen, 1987 s.132).

Modifikaatioindeksi (MI) testaa, voidaanko parametria pitää mallissa kiinnitettynä tai rajoitettuna vai olisiko parametri vapautettava. Jos kiinnitetyn tai rajoitettuna estimoidun parametrin modifikaatioindeksin arvo on suuri, niin vapauttamalla parametri mallin χ^2 -testi piene-

nee enintään modifikaatioindeksin arvolla. Jos taas modifikaatioindeksin arvo on nolla, niin kiinnitettynä tai rajoitettuna estimoitu parametri on ilmeisesti ei-identifioituva. (Leskinen, 1987 s.133) Modifikaatioindeksin perusteella voidaan vapauttaa vain yksi parametri kerrallaan.

Estimoitujen parametrien pitää olla tilastollisesti ja tulkinnallisesti mielekkäitä. Sekä kiinteänä vakiona että rajoitettuna tai vapaana estimoitun parametrin tulee olla tilastollisesti ja sisällöllisesti järkevä. Samoin kaikkien korrelaatioiden tulee olla väliltä $[-1,1]$, varianssien positiivisia ja matriisien Θ_ε , Θ_δ ja Σ positiivisesti definiittejä. Jos yksikin mallin estimoitu parametri on kelvoton, mallin estimointi ei ole onnistunut johtuen esimerkiksi virheellisestä mallin spesifikaatiosta, identifioitumattomuudesta tai väärästä normaalijakaumaoletuksesta. Tällöin malli on spesifioitava ja estimoitava siten, että kelvoton parametri kiinnitetään tai estimoidaan rajoitettuna.

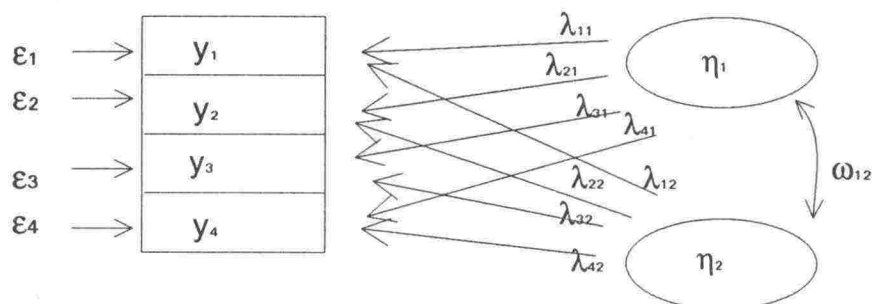
3.3 Faktorianalyysi

3.3.1 Klassinen faktorianalyysi

Faktorimallin yhtälö (3.2) voidaan kirjoittaa seuraavaan muotoon:

$$\begin{cases} y_1 = \lambda_{11}\eta_1 + \lambda_{12}\eta_2 & +\lambda_{13}\eta_3 \dots & +\lambda_{1k}\eta_k + \varepsilon_1 \\ y_2 = \lambda_{21}\eta_1 + \lambda_{22}\eta_2 & +\lambda_{23}\eta_3 \dots & +\lambda_{2k}\eta_k + \varepsilon_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_p = \lambda_{p1}\eta_1 + \lambda_{p2}\eta_2 & +\lambda_{p3}\eta_3 \dots & +\lambda_{pk}\eta_k + \varepsilon_p \end{cases} \quad (3.11)$$

Yhtälöstä 3.1 saadaan vastaavat lausekkeet. Muuttujat $\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_p)$ ovat indikaattorimuuttujia taustalla vaikuttavista faktoreista $\boldsymbol{\eta} = (\eta_1, \dots, \eta_k)$. Kuvassa 3.2 on esimerkkinä neljän havaitun muuttujan $\mathbf{y} = (y_1, y_2, y_3, y_4)$ muodostama kahden faktorin malli. Tutkimalla muuttujien kovarianssirakennetta on päädytty siihen, että neljän havaitun muuttujan arvoihin vaikuttaa itse asiassa vain kaksi piilomuuttujaa, faktoria.



Kuva 3.2: Vuokaavio faktorimallista, jossa on neljä havaittua muuttujaa ($p=4$) ja kaksi faktoria ($k=2$).

Faktorimallin ratkaisussa (ks. luku 3.2) saadaan lataukset λ_{ij}

$$\Lambda_y = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} \\ \lambda_{31} & \lambda_{32} \\ \lambda_{41} & \lambda_{42} \end{bmatrix}.$$

Faktoria selittävät parhaiten ne havaitut muuttujat, joiden lataukset ovat (itseisarvoltaan) suuria. Kunkin faktorin latausten etumerkkejä voidaan vaihtaa päinvastaisiksi tulkinnan helpottamiseksi (Lawley, Maxwell, 1971 s.7 ja s.67).

Mallin rotatoinnilla etsitään tulkinnallisesti parempaa mallia. Faktori-mallin rotatointi on matemaattinen toimenpide, jolla etsitään tulkinnal-lisesti sopivaa esitystä havaintojen kovarianssirakenteelle. Siinä faktorimallin ratkaisua muutetaan siten, että mallin parametrien esti-maattien yhteensopivuus otoskovarianssimatriisin kanssa pysyy ennallaan (ks. 3.1.2). Seuraavaksi osoitetaan, että rotatoinnissa löydetään mallille useita ratkaisuja. Olkoon T epäsingulaarinen ($m \times m$)-matriisi ja Σ_{yy} sen faktorimallin kovarianssimatriisi, jossa latausmatriisi on Λ_y . Valitaan toiseksi faktorimallin ratkaisuksi $\Lambda^* = \Lambda_y T$ ja $\Phi^* = T^1 \Phi (T^1)'$. Tällöin $\Lambda^* \Phi^* \Lambda^{*'} + \Theta_\epsilon = \Lambda_y \Theta_\epsilon \Lambda_y' + \Theta_\epsilon = \Sigma_{yy}$, eli ratkaisuja on ylinumeroituva määrä.

Mallin ratkaisussa saadaan myös faktoreiden välinen kovarianssi-matriisi

$$\Omega = \begin{bmatrix} \omega_{11} & \omega_{12} \\ \omega_{21} & \omega_{22} \end{bmatrix}.$$

Matriisi on symmetrinen eli $\omega_{12} = \omega_{21}$. Faktorit voidaan olettaa korreloimattomiksi keskenään (ortogonaalisiksi) asettamalla rajoitus $\omega_{12} = \omega_{21} = 0$ estimoinnissa, muuten faktorit korreloivat (oblique). Usein faktorien varianssit on skaalayksikäsitteisyyden takia kiinnitetty ykköksi, $\omega_{11} = \omega_{22} = 1$.

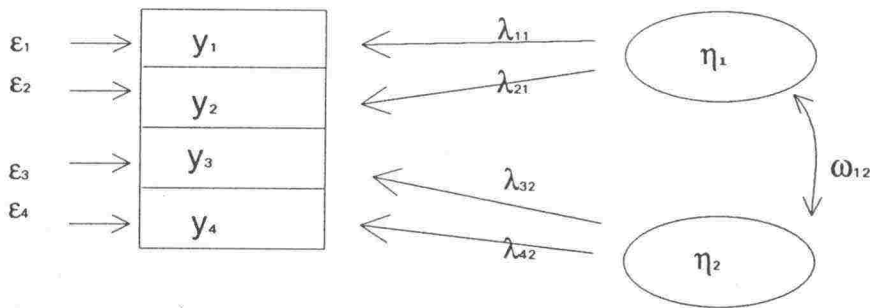
Klassisessa faktorianalyysissä oletetaan ϵ -mittausvirheiden keskinäinen korreloimattomuus, joten niiden kovarianssimatriisi Θ_ϵ on diagonaalinen.

3.3.2 Ensimmäisen kertaluvun konfirmatorinen faktorianalyysi

Yhtälöiden (3.1) $x = \Lambda_x \xi + \delta$ ja (3.2) $y = \Lambda_y \eta + \epsilon$ spesifioima malli voi olla joko klassisen tai konfirmatorisen faktorianalyysin malli. Konfirmatorinen faktorianalyysi on hypoteesejä varmentavaa ja klassinen on eksploratiivista eli kokeilevaa. Konfirmatorisen analyysin tutkimushypoteesit perustuvat aikaisemmin tehtyihin klassisiin faktorianalyysihin tai teoreettiseen ajatteluun, jota hyödynnetään konfirmatorisen faktorimallin spesifikaatiovaiheessa. Konfirmatorisessakin tutkimuksessa voidaan tehdä mallille luonteeltaan eksploratiivisia kokeiluja riittävyystarkastelujen perusteella. Konfirmatorisen ja eksploratiivisen tutkimusotteen yhdistämisellä taataan, että pystytään tutkimaan mielenkiintoisia hypoteeseja ja tutkimuksen tulos on käyttökelpoinen.

Konfirmatorisessa faktorianalyysissä faktoreiden lukumäärä on tiedossa ennen analyysiä. Myös muita täsmennyksiä tehdään mallin spesifikaatiossa (ks. 3.2.1). Latausmatriisiin Λ_y parametreja rajoitetaan, tai niitä estimoidaan yhtäsuurina muiden latausten kanssa. Usein kussakin faktorissa asetetaan yhden muuttujan, ennakkotiedon mukaan faktoria parhaiten kuvaavan muuttujan, lataus ykköseksi. Konfirmatorissa faktorianalyysissä voidaan klassisesta faktorianalyysistä poiketen olettaa mittausvirheiden korreloivan keskenään, eli ϵ -jäännösvektorin kovarianssimatriisi ei ole välttämättä diagonaalinen. Faktorit voidaan olettaa ortogonaalisiksi ja kiinnittää niiden väliset kovarianssit nolliksi.

Konkeneeriset mittausmallit ovat konfirmatorisia malleja, joissa kukin muuttuja mittaa vain yhtä faktoria (samansukuisten muuttujien mallit), joten latausmatriisin Λ_y kullakin vaakarivillä on vain yksi nollasta poikkeava lataus. Kuvassa 3.3 on esitetty kahden faktorin konkeneerinen mittausmalli. Tällainen mittausmalli on tulkinnallisesti selkeä, ja sitä voidaan käyttää, jos mallityyppi sopii sisällöllisesti tutkimusongelmaan ja riittävyystarkastelujen testit (ks. 3.2.5) osoittavat mallin sopivan aineiston kovarianssirakenteeseen.



Kuva 3.3: Vuokaavio konkeneerisesta mittausmallista, jossa on neljä havaittua muuttujaa ($p=4$) ja kaksi faktoria ($k=2$).

Kuvan 3.3 mittausmallin lineaarisiksi yhtälöiksi saadaan kaavoista (3.11)

$$\begin{cases} y_1 = \lambda_{11}\eta_1 + 0\eta_2 + \varepsilon_1 \\ y_2 = \lambda_{21}\eta_1 + 0\eta_2 + \varepsilon_2 \\ y_3 = 0\eta_1 + \lambda_{32}\eta_2 + \varepsilon_3 \\ y_4 = 0\eta_1 + \lambda_{42}\eta_2 + \varepsilon_4 \end{cases} \quad (3.12)$$

jolloin latausmatriisi on

$$\Lambda_y = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & 0 \\ \lambda_{21} & 0 \\ 0 & \lambda_{32} \\ 0 & \lambda_{42} \end{bmatrix}.$$

Skaalayksikäsitteisyyden takia (ks. luku 3.2.1) asetetaan usein faktoria parhaiten kuvaavan muuttujan lataus ykköseksi, esimerkiksi $\lambda_{11}=1$ ja $\lambda_{32}=1$.

3.3.3 Toisen kertaluvun konfirmatorinen faktorianalyysi

LISREL-mallin yhtälöstä (3.2) $y = \Lambda_y \eta + \varepsilon$ saadaan toisen kertaluvun konfirmatorinen faktorimalli, jos η -faktorit voidaan kuvata myös fakto-reilla. Keskenään korreloivien η -faktoreiden korrelaatio aiheutuu yleisemmästä faktorirakenteesta, joka on generoinut η -faktoreiden kovarianssirakenteen Ω .

Malli kuvataan LISREL-mallin yhtälöillä (3.2) ja (3.3)

$$\begin{cases} y = \Lambda_y \eta + \varepsilon & (3.13) \\ \eta = \Gamma \xi + \zeta, & (3.14) \end{cases}$$

jolloin mallin muuttujat saavat seuraavat merkitykset:

η = ensimmäisen kertaluvun faktori,
 ξ = toisen kertaluvun faktori,
 Λ_y = ensimmäisen kertaluvun mallin latausmatriisi,
 Γ = toisen kertaluvun mallin latausmatriisi,
 ζ = rakennemallin virhetermit ja
 $\text{cov}(\zeta) = \Psi$ = toisen kertaluvun faktoreiden kovarianssirakenne.

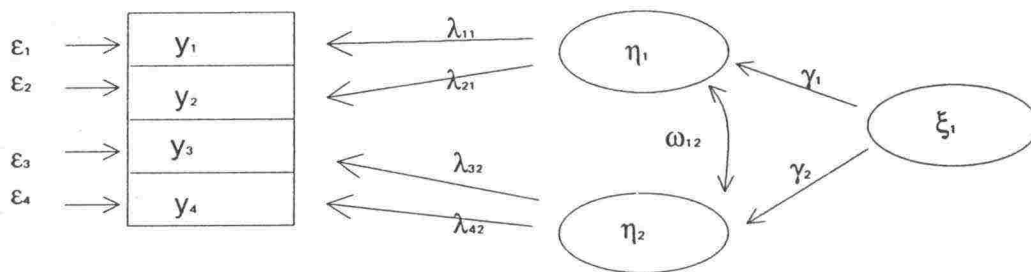
Yhtälössä (3.14) on yhtälön (3.3) matriisille $B=0$.

Ensin mallitetaan y -muuttujien kovarianssirakenne ensimmäisen kertaluvun faktorimallilla $\Sigma_{yy} = \Lambda_y \Omega \Lambda_y' + \Theta_\varepsilon$, jossa edelleen korreloitu-neilla η -faktoreilla on latentti rakenne $\Omega = \Gamma \Phi \Gamma' + \Psi$. Kovarianssirakenne kuvataan yhtälöllä

$$\Sigma_{yy} = \Lambda_y \Omega \Lambda_y' + \Theta_\varepsilon = \Lambda_y (\Gamma \Phi \Gamma' + \Psi) \Lambda_y' + \Theta_\varepsilon$$

(Leskinen, 1987 s.158).

Kuvan 3.3 mittausmallin rakentamista voidaan jatkaa toisen kertalu-vun konfirmatoriseksi malliksi (kuva 3.4), jos η -faktoreiden korrelaatio ω_{12} voidaan tulkinnallisesti ja testisuureiden perusteella olettaa aiheutuvan faktorista ξ_1 .



Kuva 3.4: Esimerkki toisen kertaluvun konfirmatorisesta faktorimallista.

Toisen kertaluvun faktorimallin rakentamiseen kuuluvat luvun 3.2 faktorimallin rakentamisen vaiheet. Malli rakennetaan käytännössä ensin ensimmäisen kertaluvun faktorimalliksi yhtälön (3.13) mukaan, ja sen rakentamista jatketaan LISREL-mallina yhtälön (3.14) mukaan toisen kertaluvun malliksi. Toinen vaihtoehto on käyttää joko $\hat{\Omega}$:aa tai faktoripistemäärämuuttujien (ks. 3.3.5) kovarianssimatriisista, jolloin rakennetaan peräkkäin kaksi ensimmäisen kertaluvun konfirmatorista faktorimallia. (Leskinen, 1987 s.162)

3.3.4 Faktorimallin identifioituvuus

Luvun 3.2.2 LISREL-mallin identifioituvuuden perusteella voidaan konfirmatorisen faktorimallin identifioituvuudelle johtaa välttämättömiä, mutta ei riittäviä ehtoja. Ensimmäisen kertaluvun faktorimallissa (3.2) on parametreja matriiseissa Λ_y , Ω ja Θ_ε yhteensä $s = pm + \frac{1}{2}m(m+1) + p = \frac{1}{2}(2p+m)(m+1)$ kappaletta. Jos mallin parametreista kiinnitetään r kappaletta (joko vakioiksi tai rajoitetuksi), niin estimoitavia parametreja saa olla korkeintaan kovarianssimatriisista Σ_{yy} ratkaistujen yhtälöiden määrä $\frac{1}{2}p(p+1)$ vähennettynä r :llä. Malli on ratkaistavissa, jos $s < \frac{1}{2}p(p+1) - r$. Jos malli ei ole identifioituva, se voidaan estimoida asettamalla parametreille lisää kiinnityksiä.

Identifioituvuus liittyy erityisesti konfirmatoriseen faktorianalyysiin, jossa mallin spesifikaatiovaiheessa tehdään mallin valinta ja parametrien kiinnitys siten, että malli ei ole enää vapaasti rotatoitavissa kuten klassisessa faktorianalyysissä (ks. 3.3.1). Tämän takia konfirmatorisen faktorimallin parametreille asetetaan vähintään m^2 rajoitusta, jotta malli on yksikäsitteinen ja rotatoinnilla ei saada mallille

uutta ratkaisua (klassinen faktorianalyysin malli ei ole rotaatioyksikäsitteinen, eikä se ole koskaan identifioituva). Välttämättömänä ehtona rotaatioyksikäsitteisyydelle on, että $s-r$ ei saa ylittää yhtälöiden lukumäärää $j \geq m^2$ (Leskinen, 1983 s.9).

Edellisistä tarkasteluista saadaan faktorianalyysin mallin (3.2) identifioitavuuden välttämätön ehto $r \geq \max[s - \frac{1}{2}p(p+1), m^2]$. Riittävää määrää on vaikea määrittää. (Leskinen, 1983 s.9).

3.3.5 Faktoripistemäärät

Faktorit eivät ole faktorianalyysin mallissa (3.11) parametreja, joten niiden arvot eivät estimoidu suoraan mallin ratkaisussa. Estimoituja faktoreita kutsutaan faktoripistemääriksi. Faktoripistemäärät lasketaan faktorianalyysin yhteydessä lineaarisella regressiolla mallista $y = \Lambda_y \eta + \epsilon$ parametrien η sovitteina. Lisäestimointia tarvitaan, koska p kappaleesta y -muuttujia ei voida estimoida p kappaletta ϵ -virheitä ja m kappaletta η -faktoreita.

Regressioanalyysiä sovelletaan matriiseihin $E(yy') = \Lambda_y \Omega \Lambda_y' + \Theta_\epsilon = \Sigma_{yy}$ ja $E(y\eta') = E(\Lambda_y \eta + \epsilon)\eta' = \Lambda_y \Omega$, josta saadaan faktoreiden sovitteille kaava

$$\eta^* = \hat{\Omega} \hat{\Lambda}_y' \hat{\Sigma}_{yy}^{-1} y \quad (3.15)$$

(Lawley, Maxwell, 1971 s. 106 - 108). Esimerkiksi kuvan 3.3 mittausmallille faktoripistemäärät ovat seuraavat mitattujen y -muuttujien lineaariset lausekkeet:

$$\begin{aligned} \eta_1 &= a_1 y_1 + b_1 y_2 + c_3 y_3 + b_4 y_4 \quad \text{ja} \\ \eta_2 &= a_1 y_1 + b_1 y_2 + c_3 y_3 + b_4 y_4. \end{aligned}$$

Sijoittamalla faktoripistemäärien lausekkeeseen havaitut arvot y_i , $i=1, \dots, p$ saadaan faktoripistemäärien arvoja $\hat{\eta}_j^*$, $j=1, \dots, m$.

Faktoripistemäärät ovat harhaisia, koska niiden estimoinnissa on epätarkkuutta, joka aiheutuu otoksesta ja sen otoskovarianssimatriisista, mahdollisesta faktorimallin väärästä spesifikaatiosta ja faktoripistemäärien lineaarisesta regressiosta (Leskinen, 1987 s.60 - 64). LISREL 7-ohjelmistossa faktoripistemäärät estimoidaan edellä selitetyllä tavalla lineaarisella regressiolla. Tässä työssä faktoripistemääriä käytetään uusien kuntomuuttujien laskentaan.

4 AINEISTO JA HYPOTEESIT

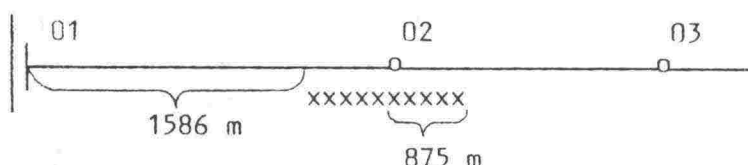
4.1 Mittausmenetelmät

Tien kuntomittaus tehdään kolmessa osassa: poikittainen ja pituussuuntainen epätasaisuus mitataan samanaikaisesti palvelutasomittarilla, vauriot saadaan vaurioinventoinnilla ja kantavuus mitataan pudotuspainolaitteella. Tiepiirit suorittavat mittaukset pääosin itse ja osan hoitaa VTT:n tie-, geo- ja liikennetekniikan laboratorio. Mittaukset päivitetään tiepiireissä tierekisteriin, josta ne toimitetaan tiehallitukseen. Vuodesta 1991 lähtien mittaukset on koottu tiepiireissä erilliseen kuntotietorekisteriin.

Teiden kuntomittauksia tehdään kolmesta syystä. Koko tieverkolta tehdään mittauksia, koska tiepiirit ja tiehallitus tarvitsevat tietoa tieverkon yleiskunnosta. Toimenpidesuunnittelu PMS91-ohjelmalla ja tielaitoksen tulostavoiteanalyysi perustuvat näihin mittauksiin. Tutkimuskäyttöä varten on mitattu vuodesta 1988 alkaen nk. otosteiden kuntoa. Otosteiksi on valittu tiepiireistä 3000 kappaletta kilometrin pituisia kesto- ja kevytpäälysteisiä tieosuuksia. Laadunvalvontamittauksilla valvotaan urakoitsijoiden päällystystyön laatua. Tällöin mitataan vain uuden tien pituussuuntainen epätasaisuus.

Mittaustieto sijoitetaan tieverkolle tieosoitteiston avulla. Jokaisella tiellä on tienumero. Tie jaetaan edelleen yleensä liittyvien teiden väliseksi tieosiksi, jotka numeroidaan juoksevasti kullekin tielle. Tieosoite koostuu viidestä tunnistemuuttujasta, jotka ovat seuraavat: tiepiiri, tie, alkupisteen tieosa, alkupisteen etäisyys tieosan alusta, loppupisteen tieosa ja loppupisteen etäisyys tieosan alusta (kuva 4.1).

Tiepiiri 2, tie 2621



Välin xxx tieosoite on 2 2621 01 1586 - 02 875

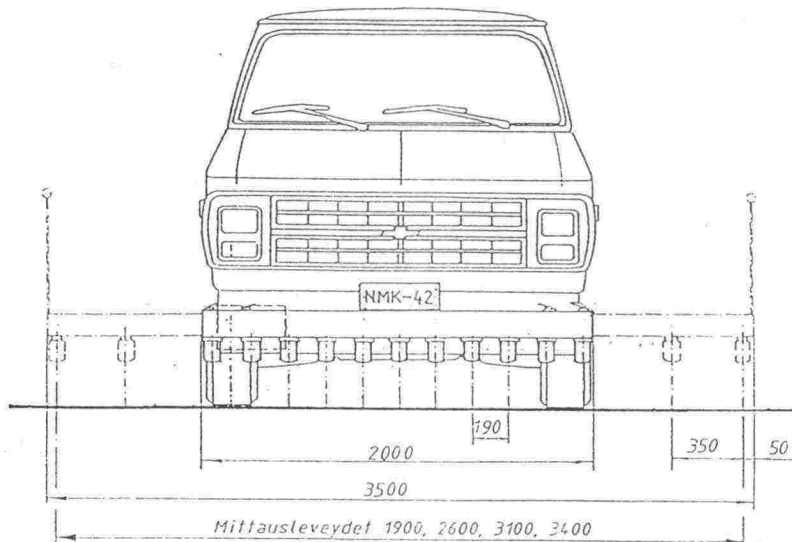
Kuva 4.1: Mittaustiedon tieosoite.

Poikittainen ja pituussuuntainen epätasaisuus sekä vauriot mitataan sadan metrin tieosuuksina niin, että tieosa ei vaihdu mittausosuudella. Mittausosuuden alku- ja loppuetäisyydet vaihtelevat, mutta osuudet pyritään mittaamaan tasoina satametrisinä. Tien kantavuus mitataan pistekohtaisesti, mutta mittaustiedot viedään mittausosuuden välikohtaiseksi mittaustiedoksi joko keskiarvona tai minimi- ja maksimi-arvoina (ks. 4.1.3).

4.1.1 Poikittaisen ja pituussuuntaisen epätasaisuuden mittaus

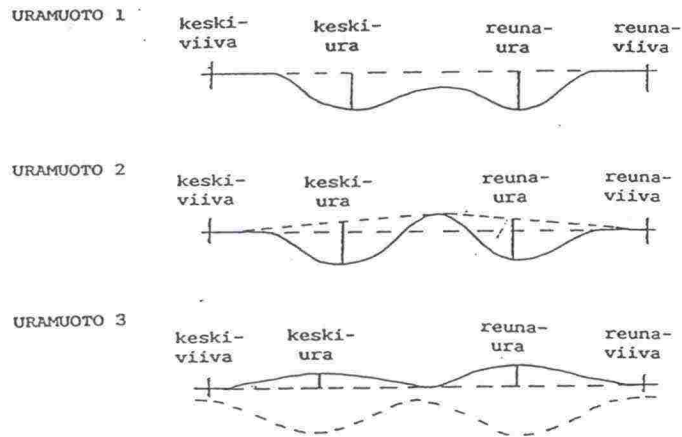
Kesto- ja kevytpäälysteteiden poikittainen ja pituussuuntainen epätasaisuus mitataan palvelutasomittarilla (tai riisutulla palvelutasomittarilla eli tasaisuusmittarilla), joka on tarvittavalla mittausvälineistöllä varustettu auto. Mittaus tapahtuu ultraääniantureilla, laseretäisyys- ja matkamittarilla, ja tulokset talletetaan levykkeelle KUNTO-mittausohjelman avulla (uusien päälysteteiden tasaisuuden laadunvalvontaan käytettävä LAATU-ohjelma tuottaa eri muuttujia). Palvelutasomittaus tehdään nopeudella 30-90 km/h, ja tulokset ovat nopeudesta riippumattomia. Mitattaessa autolla on oltava esteetön kulku, esteistä johtuvat virheelliset tulokset hylätään. Urissa ei saa olla vettä mittausten aikana. (TIEL, 1991c s.2)

Tien poikittaista epätasaisuutta kuvaavat muuttujat - keskiuran ja reuna-uran syvyys, urasyvyys, urasyvyyden maksimi ja poikittainen epätasaisuus - mitataan palvelutasomittarin uramittauspalkilla, jonka leveys säädetään tien leveyden mukaan. Urapalkkiin on asennettu 15 ultraäänianturia, joista käytetään kolmeatoista 2.6 m leveälle ajokaistalle ja viittätoista 3.1 m leveälle kaistalle (kuva 4.2). Reunimaisten ultraäänianturien mittaukset muodostavat tien tasoprofiilin, jonka suhteen keskimmäiset anturit mittaavat tien poikittaisprofiilin eroja.



Kuva 4.2: Mittausauton uramittauspalkki. (Lähde: TIEL, 1991 s.5)

Tien ajokaistassa on sekä vasemman että oikean pyörän kohdalla ura: keski- ja reunaura. Ajolinjan valinta vaikuttaa mittaustuloksiin. Ohjeena on, että auton tulisi mitata ajokaistan oikeanpuoleisen uran keskikohtaa eli uran syvintä kohtaa. Kuvassa 4.3 on esitetty yhdellä ajokaistalla olevat keski- ja reunaura, joiden väliin jäävää kohoumaa kutsutaan harjanteeksi. Urien ja harjanteen mukaan erotellaan kolme eri uramuotoa. Uramuodossa 1 tie on kulunut myös urien välistä ja harjanne on tien reunojen alapuolella, kun taas uramuodossa 2 harjanne on reunatasojen yläpuolella. Uramuodossa 3 urat ovat poikittaisprofiilin korkeimmat pisteet ja harjanne on itseasiassa kuopassa. Näin on esimerkiksi urapaikkauksen jälkeen, jossa on tehty korotettua uraa. Tällaiselle uralle annetaan negatiivisia arvoja.



Kuva 4.3: Uramuodot. (Lähde: TIEL, 1991c s.6)

Tien urasyvyys lasketaan siten, että 20 metrin välein määritetään poikkileikkauksen uramuoto sekä reuna- ja keskiuran syvyydet, joista suurempi on poikkileikkauksen urasyvyys. Sadan metrin tieosuuden uramuoto on 20 metrin mittausten uramuotojen valta-arvo, ja urasyvyyden maksimi on suurin 20 metrin mittausten urasyvyyksistä. Sadan metrin tieosuudelle urasyvyys on sadan metrin matkalle uramuotojen lukumäärällä painotettu keskiarvo (U_{MAXKA} , yksikkönä on 0.1 mm). Muuttujasta käytetään myös nimitystä maksimiurasyvyyden keskiarvo. Keskiarvoon perustuvan laskentatavan vuoksi tien todelliset urasyvyydet ovat suurempia kuin urasyvyys-muuttujan arvot. Yksikkönä uramittauksissa on millimetrin kymmenesosa 0.1 mm. (VTT, 1991). Mittausautojen välisistä eroista johtuen VTT:n vuonna 1990 mittaamien tiepiirien (Uusimaa, Turku, Häme ja Vaasa) urasyvyydet kalibroitiin vastaamaan muiden piirien mittausten tasoa. Vuonna 1991 ei kyseistä korjausta ollut enää tarvetta tehdä. (TIEL, 1991d).

Tien poikittainen epätasaisuus on uramittauspalkin ultraääniantureiden 20 metrin välein määritettyjen tasopoikkeamien itseisarvojen keskiarvo. Sadan metrin mittausulos on viiden mittauksen keskiarvo (muuttuja on $POIKT$ ja yksikkönä on 0.1 mm). Tien pituussuuntaista epätasaisuutta mitataan IRI-indeksillä (=International Roughness Index) ja yksittäisten epätasaisuuksien lukumäärällä. Palvelutasomitari tuottaa laserin, kiihtyvyysanturin ja matkamittarin avulla tien pituusprofiiliin. IRI:n laskennassa pituusprofiiliin sijoitetaan 80 km/h:ssa vakionopeudella kulkeva standardiauto, jolla on vakioidut rengas-, jousi- ja iskunvaimennusominaisuudet. Standardiauton

rungon ja tien pinnan välisestä pystysuuntaisesta liikkeestä lasketaan jousitetun ja jousittamattoman korin massan ja pyörän välinen liike. Pinnan pystysuuntainen poikkeama painotetaan siten, että saadaan mitatuksi liike pituusyksikköä kohti IRI-arvona (muuttuja IRI yksikkönä cm/km). IRI kuvaa autoilijan kokemaa tien epätasaisuuksista johtuvaa heittelehdistä henkilöautossa. Pituusprofiiliin vaikuttaa laserin mittaama pituussuuntainen tien pinnan aallonpituusalue 0.5-25 m, joten tien pinnan pienen rypytyksen aiheuttama epätasaisuus ja ties-
sä olevien suurten mäkien vaikutus pituusprofiiliin on poistettu.

Tien pituusprofiiliin määritetyt pystykiihtyvyydet luokitetaan pieniksi tai suuriksi asetettujen pystykiihtyvyyden ylä- ja alarajojen perusteella. Pystykiihtyvyys on pieni välillä $2.0\text{--}3.5\text{ m/s}^2$ ja suuri olleessaan yli 3.5 m/s^2 . Alle 2.0 m/s^2 olevia kiihtyvyyksiä ei siis huomioida. Mittauksissa lasketaan montako kertaa kiihtyvyys on välillä $2\text{--}3.5\text{ m/s}^2$ tai yli 3.5 m/s^2 mitatulla sadan metrin tieosuudella. Muuttujia voidaan käyttää myös summana (muuttuja HEITOT ja yksikkönä on kpl/100 m).

Yksittäiset epätasaisuudet eritellään myös laskennallisesti. Pituusprofiiliin poikkeamat jaotellaan poikkeamista aiheutuvien aallonpituuksien mukaan heitoiksi, painaumiksi, kohoumiksi tai kuopiksi. Aallonpituus jaotellaan kahteen luokkaan: pitkät aallot ovat aallonpituudeltaan 1.6-6.4 m ja lyhyet aallot ovat alle 1.6 m. Tien yksittäisepätasaisuudet luokitellaan tämän perusteella neljään ryhmään:

- heitto on ylöspäin suuntautuva poikkeama, jonka aallonpituus on yli 1.6 m
- painauma on alaspäin suuntautuva poikkeama, jonka aallonpituus on yli 1.6 m
- kohouma on ylöspäin suuntautuva poikkeama, jonka aallonpituus on alle 1.6 m
- kuoppa on alaspäin suuntautuva poikkeama, jonka aallonpituus on alle 1.6 m.

Ylläoleva jaottelu tehdään sekä $2.0\text{--}3.5\text{ m/s}$ että yli 3.5 m/s kiihtyvyyssalueelle, jonka perusteella heitto, painauma, kohouma tai kuoppa jaotellaan joko pieneksi tai suureksi. Mittari ei kykene erottelamaan peräkkäin olevia erilaisia yksittäisepätasaisuuksia, joten näistä kahdeksasta muuttujasta rekisteröidään kymmenen metrin tieosuudelle vain yhtä kerrallaan (TIEL, 1991c). Kirjaus tehdään sadan metrin tieosuuksina kahdeksaan eri muuttujaan.

4.1.2 Vaurioinventointi

Vaurioinventoinnilla tarkastetaan tien yksittäisvaurioita. Vaurioinventointi tehdään 5-10 km/h kulkevalla autolla (ns. hidasmittauksena) sadan metrin tieosuuksina. Vaurioinventoinnista on kerrottu tarkemmin Tielaitoksen julkaisussa Päälystevaurioiden inventointi (1992). Inventointi tehdään joko lomakkeelle tai digitointipöydän avulla, ja sillä analysoidaan molempien kaistojen seuraavat vauriot (piirin harkinnan mukaan muitakin): reiät ja purkaumat, pituus-, poikittais-, sauma-, verkko- ja isot halkemat sekä paikkaukset ja reunapainaukset. Kaikissa inventoitavissa muuttujissa luvut ovat sitä suurempia mitä vaurioituneempi sadan metrin tieosuus on.

Palvelutasomittauksen yhteydessä tehtävän vauriokartoituksen (ns. nappimittauksen) kuntotietoja ei käytetä tässä tutkimuksessa. Kartoitusta pidetään palvelutasomittauksen suuren ajonopeuden takia epäluotettavana, ja kartoituksessa kerätään vähemmän kuntomuuttujia kuin inventoinnissa, ja nekin vain yhdeltä ajokaistalta.

Vaurioinventoinnissa tiellä olevat reiät ja purkaumat lasketaan neliömetreinä (muuttuja on VREIKA yksikkönä $m^2/100\text{ m}$). Yksi reikä tai purkauma määritellään vähintään yhden neliömetrin kokoiseksi. Useat pienet reiät ja purkaumat voidaan laskea myös yhteen.

Tien pituussuuntaiset tai vinot halkeamat kirjataan metreinä pituushalkeamiksi (muuttuja on VPITHA yksikkönä $m/100\text{ m}$). Saumahalkeamia ei kuitenkaan lasketa tähän muuttujaan. Myös paikatut halkeamat inventoidaan.

Tien poikittaissuunnassa olevat vähintään kaksi metriä pitkät halkeamat lasketaan yhteen kappaleittain sadan metrin mittausosuudelta. Poikittaishalkeamiksi lasketaan myös paikatut halkeamat (muuttuja on VPOIKHA yksikkönä $kpl/100\text{ m}$). Alle kaksi metriä pitkät halkeamat lasketaan yhteen ja ilmoitetaan yhtenä poikittaishalkeamana. Mikäli halkeama poikkeaa enemmän kuin 0.5 metrin etäisyydellä oletetusta saumakohdasta, lasketaan tämä osuus pituushalkeamaksi ja loput saumahalkeamaksi.

Auennutta päälystesaumaa kutsutaan saumahalkeamaksi (muuttuja on VPAALSAU yksikkönä $m/100\text{ m}$). Jos ajokaistojen välissä oleva halkeama (keskisaumahalkeama) poikkeaa tien keskisaumasta 0.5 m kauemmaksi, kirjataan se pituushalkeamaksi. Juottamalla korjatut saumat luetaan myös halkeamiksi.

Edellisten muuttujien lisäksi pituussuuntaisista halkeamista ja saumahalkeamista eritellään isoiksi halkeamiksi ne, joissa halkeaman leveys on yli 2 cm. Halkeaman pituudesta eritellään tähän vain ko. kriteerin ylittävä osuus metreinä (muuttuja on VISOHAL yksikkönä m/100 m). Kappaleittain laskettavat poikittaishalkeamat luokitellaan isoiksi, jos niiden pituus on vähintään 4 m ja rekisteröitävä pituus on aina 4 m.

Eri levyiset ja tyyppiset verkkohalkeamat lasketaan verkkohalkeamilla olevan tiepituuden pinta-alaksi neliömetreinä (muuttuja on VVERKHA yksikkönä m²/100 m).

Tiellä olevat kokopaikkausta (kaistanlevyistä paikkausta) pienemmät paikkaukset lasketaan neliömetreinä (muuttuja on VPAIKK yksikkönä m²/100 m). Kokopaikkauksista otetaan mukaan vain alle neljän metrin pituiset. Tien urien kohdalla tehtyä paikkausta ei huomioida.

Tiellä olevasta alle metrin pituisesta painumasta eli reunapainumasta pituus talletetaan metreinä (muuttuja on VREUNAP yksikkönä m/100 m). Painuma on yleensä tien reunanpuoleisen pyörän kohdalla.

4.1.3 Kantavuuden mittaus

Teiden kantavuutta on Suomessa mitattu aiemmin joko Benkelman-palkilla (staattis-dynaaminen) tai levykuormituslaitteella (staattinen mittalaite), joissa mitataan tien pinnan liike alaspäin rasitettaessa tietä painolla. Mittalaitteista on kerrottu esimerkiksi raportissa Tien kantavuuden mittauslaitteet ja eri laitteilla määritetyt kantavuudet (VTT, 1991). Nykyisin tierekisterin kantavuusmittaus tehdään Kuabpudo- tuspainolaitteella, josta on kerrottu Tierekisterin kantavuusmittausohjeessa (TIEL, 1991b). Aiemmat mittaukset korvataan pudotuspainolaitemittauksilla vuoden 1993 loppuun mennessä, ja kantavuuden toistomittaus tielle pyritään tekemään kolmen vuoden välein.

Pudotuspainolaitteen mittaus on luonteeltaan dynaaminen. Siinä huomioidaan tien pinnan taipuma kuormituksen yhteydessä, jolloin mittaus vastaa paremmin normaalia tieliikenteen tielle aiheuttamaa rasitusta kuin staattinen mittaus. (Parantainen, 1982 s.27) Mittauksen kuormitus tiehen on yhtä suuri kuin liikkuvan kuorma-auton ja 30 millisekunnin kuormitusaika vastaa kestoajaltaan normaalia liikennekuormitusta.

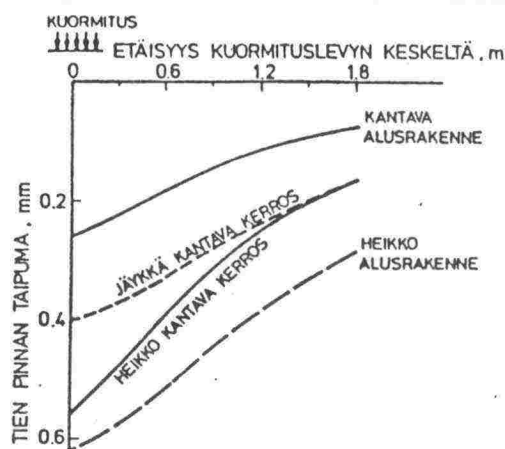
Pudotuspainolaitteella paino pudotetaan tien pinnassa olevalle halkaisijaltaan 30 cm:n kuormituslevylle, jolloin 250 kg:n paino yhdessä 50 kg rungon kanssa aiheuttaa tien pintaan noin 50 kN voiman (mittaukset korjataan vastaamaan 50 kN voimaa). Tien pinnan taipuma mitataan kuudella mittausanturilla; kuormituslevyn keskipisteestä ja 20, 45, 60, 90 ja 120 cm etäisyydeltä keskipisteestä (vuodesta 1991 alkaen), ja ne on nimetty muuttujiksi D0, D20, D45, D60, D90 ja D120. Taipumat mitataan millimetrin tuhannesosina eli yksikkönä on 0.001 mm.

Kantavuusmittaukset tehdään mittausosuudelta, joka on yleensä tieosa. Tieosalla voi olla useampia mittausosuuksia, jos tieosan rakenne muuttuu oleellisesti. Mittausosuus mitataan vähintään viidestä kohdasta ja yli 2 km matka kymmenestä eri kohdasta väli-jaolla $[d, 3d, 5d, \dots, 19d]$, jossa d =mittausosuuden pituus/20. Otostien kantavuus mitataan sadan metrin välein kymmenestä kohdasta (otostien pituus on kilometri). Mitattuja taipumia käytetään sellaisinaan pistekohtaisena tietona, ja niistä lasketaan mittausosuuden välikohtaisia tunnuslukuja.

Pudotuspainolaitteella mitatut taipumat voidaan yhdistää (sovittaa) taipumakuvioksi eli taipumasuppiloksi, jonka avulla arvioidaan mittauspisteen kohdalta tierakenteen ominaisuuksia eri syvyyksissä. Taipumasuppilo on mittauspisteen eri etäisyyksien taipumista graafinen esitys, josta selviää tien taipuman muoto. Taipumasuppilolla saadaan käsitys tierakenteen eri kerrosten kunnosta. Lähellä kuormituslevyn keskipistettä mitatut taipumat D0 ja D20 kuvaavat päällysrakenteen yläosan ominaisuuksia, ja taipumat D45, D60, D90 ja D120 kuvaavat päällysrakenteen alaosien ja alusrakenteen kantavuusominaisuuksia. Mitä jäykempi kantava kerros on sitä loivempi taipumasuppilo on kuormituslevyn läheisyydessä (kuva 4.4). Toisaalta D0 kuvaa tien maksimitaipumaa ja kaikkien tien kerrosten yhteistä kantavuutta.

Kuormituslevyn ulkopuolisten seismometrien taipumista voidaan laskea pintakantavuudet tien eri syvyyksille. Taipuma etäisyydellä r kuormituslevyn keskikohdasta on likimäärin yhtä suuri kuin kantavuus ekvivalenttietäisyydellä r tien rakenteessa. Kantavuudet vastaaville syvyyksille määritellään esimerkiksi monisteen TIEL (1991a) kaavoilla $E0=159.15/D0$, $E20=59.68/D20$, $E45=26.53/D45$, $E60=19.89/D60$, $E90 = 13.26/D90$ ja $E120=9.95/D120$, joissa taipu-

mien yksikkö on millimetri. Nämä ovat pistekohtaisia pintakantavuuk-
sia. Kesäkantavuus KESKAN on E0:n mittausosuuden keskiarvo
yksikkönä MN/m².



Kuva 4.4: Taipumien kuvaama tien rakenteen ja pinnan heikkous.

Tierekisterin kantavuusmittaukset tehdään kesäisin, mittaukset aloi-
tetaan kesäkuussa. Tieosan kevätkantavuus lasketaan tieosalle
arvioidun kevätkantavuuskertoimen avulla. Kevätkantavuus arvioi-
daan 40, 60 tai 80 prosentiksi kesäkantavuudesta kevätkantavuus-
kertoimen (muuttuja KKK) avulla. Kevätkantavuus KEVKANT =
KESKAN * KKK/100 on käytetyin tierekisterin kantavuusmuuttuja.

Edellä yhden mittauspisteen taipumia käytettiin
taipumasuppilokuvassa ja kantavuuksista laskettiin mittausosuuden
keskiarvoja. Taipumista käytetään myös mittausosuuksittain minimi-
ja maksimiarvoja. Päällysrakenteen kestävyyttä kuvaava pinnan
kuntoluku SCI (=Surface Curvature Index) on mittausosuuden taipu-
mien D0 ja D20 erotuksista D0-D20 toiseksi suurin. Sen pieni arvo
osoittaa kantavaa päällysrakennetta, jolloin tietä rasitettaessa pääl-
lysteen alapintaan syntyvä vetojännitys ei aiheuta merkittäviä
muodonmuutoksia. Pohjamaan rakenteen kestävyys näkyy alusra-
kenteen kuntoluvussa BCI (=Base Curvature Index), joka on mittau-
sosuuden erotuksien D90-D120 toiseksi suurin arvo. BCI:n pieni arvo
osoittaa kantavaa alusrakennetta. TMITKANT on tien mitoittava
kevätkantavuus, joka on kevätkantavuuden KEVKANT * KKK/100
toiseksi pienin arvo mittausosuudella. Tierekisteriin lasketaan lisäksi
alusrakenteen mitoittava kevätkantavuus AMITKANT, joka on toisek-
si pienin mittausosuuden arvoista E120 * KKK/100. Tieosan kantavuu-

den vaihtelua kuvataan hajonnalla $TAIHAI = (D0:n \text{ hajonta} / D0:n \text{ keskiarvo}) * 100\%$. Hajonta lasketaan variaatiokertoimen tapaan prosenttina mittausosuuden kantavuuden keskiarvosta.

Taipumalle D0 on tehty lämpötilakorjaus 20 °C:een (aiemmin myös muille taipumille). Asfalttipäällysteisillä teillä lämpötila vaikuttaa kantavuusmittauksiin, koska päällysteen ominaisuudet ovat lämpötilariippuvia asfaltissa olevan bitumin jäykkyyden muuttuessa. Asfalttikerroksen keskimääräinen lämpötila määritetään asfaltin pintalämpötilasta, ilman lämpötilasta ja vuorokaudenajasta. (Ryynänen, Belt, Ehrola, 1990 s.1). Kantavuutta ei mitata asfalttiteiltä, joiden lämpötila on alle 5 °C tai yli 35 °C.

4.2 Aineiston kuvaus

Aineisto sisältää Suomen kestopäällysteteiltä tehtyjä mittauksia vuodelta 1991. Aineistoon on otettu tieosuuksia, joista on palvelutasomittaus, vaurioinventointi ja pudotuspainolaitemittaus (liite 3). Aineistosta on poistettu mittaukset niiltä tieosilta, joille on tehty vuonna 1991 päällystys tai rakenteen parantaminen. Tiererekisteriin kirjaetaan tien päällystykset ja toimenpiteet, jotka ovat tien rakentaminen, suuntauksen tai rakenteen parantaminen ja muut kevyet toimenpiteet. Aineiston keräys ei perustu otantaan.

Aineistoon pyrittiin saamaan kaikki mahdolliset tien kuntoa kuvaavat muuttujat vuodelta -91. Vauriomuuttujista käytetään verkkohalkeamia ($m^2/100 \text{ m}$), pituushalkeamia ($m/100 \text{ m}$), poikittaishalkeamia ($kpl/100 \text{ m}$), isoja halkeamia ($m/100 \text{ m}$), saumahalkeamia ($m/100 \text{ m}$), paikkauksia ($m^2/100 \text{ m}$), reikiä ja purkauksia ($m^2/100 \text{ m}$) sekä reunapainauksia ($m/100m$). Tien poikittaisen epätasaisuuden muuttujina käytetään urasyvyyttä (0.1 mm) ja poikittaista epätasaisuutta (0.1 mm). Kantavuusmittauksista käytetään tien päällysrakenteen pinta-kerrosten kestävyyttä kuvaavia muuttujia: kevätkantavuus, TMIT-KANT ja SCI. Muuttujat AMITKANT ja BCI kuvaavat tien päällysrakenteen alakerrosten ja alusrakenteen kantavuutta. Pituussuuntainen epätasaisuus mitataan IRI:llä (cm/km tai 0.01 mm/m) ja heitoilla ($kpl/100 \text{ m}$).

Aineisto koostuu pituudeltaan keskimäärin 3.3 kilometrin tieosista, joita on 468 kappaletta. Mittauksia on tiepiireistä kilometreittäin seuraavasti: Uudeltamaalta 159, Turusta 198, Hämeestä 82, Kymsestä 46, Mikkelistä 205, Pohjois-Karjalasta 235, Keski-

Suomesta 240, Keski-Pohjanmaalta 352 ja Lapin tiepiiristä 42, yhteensä 1559 kilometriä. Aineiston kaikki tiet ovat asfalttipäällysteisiä, kestopäällystetöiden päällysteitä: (sementti)betoni, valuasfaltti tai kiveys ei tullut mukaan. Viimeisimmästä päällystyksestä on kulunut keskimäärin 5.5 vuotta. Päällysteen ikä vaihteli yhdestä viiteentoista vuoteen, ja vuoden ikäisiä päällysteitä oli 27 %. Teistä 1235 kilometriä (79 %) on valta- ja kantateitä (ns. pääteitä) ja muita teitä on 324 kilometriä (21 %), jotka jakaantuvat seudullisiin teihin (160 km), kokoojateihin (122 km) ja yhdysteihin (41 km). Vuorokautinen liikennemäärä (KVL) on alle 1500 autoa 479 km:llä (31 %), 1500-6000 autoa vuorokaudessa 1034 km:llä (66 %) ja yli 6000 autoa 46 km:llä (3 %). Raskaan liikenteen määrä (KVL_R) vuorokaudessa vaihtelee 14:sta 1489:ään ajoneuvoon keskiarvon ollessa 279 ajoneuvoa.

4.3 Muunnokset

LISREL-malli olettaa muuttujien olevan multinormaalijakautuneita, tai lievimmillään se olettaa jakauman olevan kuvattavissa ensimmäisen ja toisen origomomentin avulla, joita ovat keskiarvo ja keskihajonta (jakauma oletetaan symmetriseksi). Multinormaalijakautuneisuusoletuksen takia kunkin muuttujan jakauman vinoutta poistettiin ja vinous- ja huipukkuustunnusluvut pyrittiin saamaan nolliksi.

Vauriomuuttujat olivat joko usein esiintyviä tai harvinaisia. Yleisimmät vauriot olivat pituus-, poikittais- ja saumahalkeamat. Niitä esiintyi samassa järjestyksessä lueteltuna 88 %:lla, 68%:lla ja 70%:lla teistä. Muut vauriot olivat harvinaisia, verkkohalkeamia esiintyi 28 %:lla teistä, paikkoja esiintyi 12 %:lla teitä, isoja halkeamia 11 %:lla, reikiä 8 %:lla ja reunapainauksia vain 3 %:ssa teistä. Täysin vauriotonta tietä aineistossa oli vain 131 km:ä, joten vaurioinventointi tehdään yleensä keskimääräistä vaurioituneemmalle tielle. Aineisto ei kuvaa koko tieverkkoa, vaan keskimääräistä vaurioituneempaa tieverkkoa. Vaurioita ei synny heti tien rakentamisen jälkeen vaan tien vanhetessa. Kuitenkin urien takia tie päällystetään usein ja vauriot peitetään, mikä johtaa vaurioiden vinoihin jakaumiin. Alussa vauriomuuttujien vinouden takia niiden jakaumat ajateltiin karkeistettavan dikotomisiksi muunnoksella 0=ei ole vauriota ja 1=vaurio esiintyy. Tällöin muuttujan arvo nolla osoittaa, että tiellä on kaikki kunnossa, ja arvo yksi osoittaa tiellä olevan vaurioita. Dikotomisten muuttujien välinen korrelaatio lasketaan polykoorisena korrelaationa, ja dikotomisen ja jatkuva-asteikollisen muuttujan välinen korrelaatio on esimerkiksi

polyseriaalinen korrelaatio, joiden yhteydessä estimointimenetelmänä käytetään WLS-menetelmää ML-menetelmän sijasta (ks. 3.1.2 ja 3.2.3). Estimointi ei kuitenkaan onnistunut (luku 5). Asteikon muunnos on myös hyvin radikaali, kun jatkuva-asteikollinen muuttuja pakotetaan dikotomiseksi, jolloin jakaumainformaatiota häviää. Vauriomuuttujan voisi ehkä olettaa normaalijakautuneeksi ehdolla, että tie on jo vaurioitunut.

Aineistoa käytettiin kaikkien muuttujien osalta tieosakohtaisina keskiarvoina. Havaintoyksikköinä ovat 468 tieosaa sen sijaan, että olisi käytetty 17 517:tä sadan metrin mittauksia. Tieosakohtaisilla keskiarvoilla pystyttiin poistamaan jonkin verran vauriomuuttujien vinoutta. Samoin kantavuusmuuttujien mittaustavan vuoksi (ovat tieosakohtaisia tunnuslukuja) päädyttiin tieosakohtaisiin havaintoihin, koska sadan metrin mittaustietojen yhteydessä tulisi kantavuusmuuttujista käyttää myös pistekohtaisesti laskettuja kantavuuksia, jotta havainnot olisivat keskenään riippumattomia. Samoin havaintojen määrän vaikutus mallin testisuureihin puolsi pienemmän havaintomäärän käyttöä; suositus on alle 500 havainnon otos (ks. 3.2.4). Myös tielaitos käyttää tieosakohtaisia arvoja. Muuttujien vinouden takia tieosakohtaiset keskiarvot on lisäksi logaritmoitu luonnollisella (e-kantaisella) logaritmillä.

Transformoitujen muuttujien keskiarvo, keskihajonta ja muuttujan jakauman vinoutta (skewness) ja huipukkuutta (kurtosis) osoittavat tunnusluvut on laskettu taulukkoon 4.5. Samoin taulukossa ovat muuttujan pienin ja suurin arvo sekä frekvenssi-sarakkeissa pienimmän ja suurimman arvon kappalemäärät. Muunnosten jälkeenkin muuttujien jakaumat ovat edelleen vinoja. Normaalin jakauman vinous on nolla ja kolmonen osoittaa jo vinoa jakaumaa. Urasyvyyden jakauma tiedettiin ennakolta vinoksi. Kuitenkin vuonna 1990 aloitetun tulospalkkiojärjestelmän ansiosta syvät urat (maksimi aineistossa on 18.5 mm) ovat vähentyneet, joten sekä huipukkuus että vinous ovat logaritmoiduille urasyvyydelle ja poikittaiselle epätasaisuudelle suhteellisen normaaleja (taulukko 4.5).

	keski- arvo	hajon- ta	vinous	huipuk- kuus	mini- mi	kpl	maksi mi	kpl
urasyvyys	1.3	0.7	-0.9	2.9	-2.3	2	2.8	1
poikit. epätasaisuus	1.3	0.4	-0.5	0.4	-0.3	1	2.2	1
IRI	0.7	0.3	0.7	0.6	-0.1	1	1.9	1
heitot	-2.1	0.5	3.8	15.1	-2.3	392	0.8	1
verkkohalkeamat	-0.8	1.8	1.0	-0.2	-2.3	200	4.6	1
pituushalkeamat	1.9	1.6	-1.2	0.9	-2.3	36	5.4	1
poikkihalkeamat	0.2	1.3	-0.6	-0.5	-2.3	57	3.1	1
isot halkeamat	-1.7	1.1	2.1	4.1	-2.3	349	4.2	1
saumahalkeamat	1.1	2.1	-0.5	-1.0	-2.3	90	4.7	1
reiät ja purkaumat	-1.7	0.9	1.9	3.4	-2.3	249	2.7	1
paikat	-1.6	1.3	2.1	4.2	-2.3	299	4.1	1
reunapainumat	-2.1	0.7	4.7	25.7	-2.3	427	3.8	1
kevätkantavuus	5.7	0.3	-1.2	4.7	4.2	4	6.5	1
TMITKANT	5.5	0.3	-1.4	4.4	3.8	4	6.4	1
SCI	4.8	0.3	0.0	1.2	3.4	1	6.0	4
BCI	3.4	0.3	-0.3	0.6	2.3	2	4.4	1
AMITKANT	4.3	0.4	-0.9	3.1	2.6	4	5.2	3

Taulukko 4.5: Transformoitujen muuttujien tunnuslukuja.

4.4 Korrelaatiomatriisi

Edellisessä luvussa esitettyjen transformoitujen muuttujien välinen korrelaatiomatriisi taulukossa 4.6 koostuu tavallisista (Pearsonin) korrelaatioista. Korrelaatioiden negatiivisten tai positiivisten merkkien tulkinnoissa tulee huomioida muuttujien akselistojen suunnat. Muuttujissa SCI ja BCI pienet arvot osoittavat tien olevan hyväkuntoinen, muilla kantavuusmuuttujilla suuret arvot osoittavat kantavuudeltaan kestäväää tietä. Vauriomuuttujissa ja poikittaisen ja pituussuuntaisen epätasaisuuden muuttujissa pienet arvot osoittavat vauriotonta tietä.

Urasyvyyden ja poikittaisen epätasaisuuden keskinäinen korrelaatio 0.22 on pienehkö. Muiden kuntomuuttujien kanssa urasyvyys ja poikittainen epätasaisuus eivät korreloi, korrelaatiot ovat lähes nollia ja korrelaatioiden etumerkit vaihtelevat. Poikkeuksena ovat BCI- ja AMITKANT-kantavuusmuuttujien korrelaatiot 0.23 ja -0.13. Korrelaatioiden suuruuteen voisi kenties vaikuttaa jakamalla urasyvyyden liikennemäärällä tai raskaalla liikennemäärällä, jolloin muuttuja ilmoittaisi kulutetun urasyvyyden autoa kohti. Kuitenkin liikennemäärä vaikuttaa myös vaurioihin ja pituussuuntaiseen epätasaisuuteen. Vilkasliikenteisellä tiellä on parempi kantavuus, koska se rakennetaan kestäväksi, ja vähän vaurioita, koska ne päällystetään usein. Aineiston voisi ehkä jakaa liikennemäärältään eri luokkiin.

AINEISTO JA HYPOTEESEIT

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
A urasyvyys	1																
B poikitt.epätasaisuus	.22	1															
C IRI	.03	-.12	1														
D heitot	-.02	-.08	.60	1													
E verkkohalkeamat	-.08	.05	.26	.15	1												
F pituushalkeamat	.05	.14	.09	.06	.42	1											
G poikittaishalkeamat	.10	.18	-.12	-.10	.09	.21	1										
H isot halkeamat	-.04	.03	.11	.04	.28	.33	.10	1									
I saumahalkeamat	.09	.09	.03	-.02	.37	.48	.36	.24	1								
J reiät ja purkaumat	-.06	-.00	.24	.18	.35	.19	.09	.23	.21	1							
K paikkaukset	-.06	-.03	.18	.05	.32	.18	.05	.21	.10	.37	1						
L reunapainumat	-.01	.04	.10	.08	.39	.16	-.03	.31	.10	.26	.23	1					
M kevätkantavuus	-.01	.04	-.46	-.39	-.37	-.18	.15	-.13	-.03	-.18	-.19	-.13	1				
N TMITKANT	.01	.07	-.51	-.40	-.41	-.18	.13	-.18	-.07	-.22	-.24	-.17	.95	1			
O SCI	.05	-.04	.34	.27	.28	.14	-.19	.07	-.11	.08	.15	.12	-.83	-.79	1		
P BCI	.06	.23	.28	.16	.23	.24	.08	.12	.16	.16	.11	-.06	-.55	-.61	.42	1	
Q AMITKANT	-.09	-.13	-.36	-.24	-.28	-.21	-.06	-.11	-.21	-.17	-.11	-.00	.58	.64	-.31	-.74	1

Taulukko 4.6: Korrelaatiomatriisi aineiston transformoitujen muuttujien välillä. Korrelaatio on tilastollisesti merkittävä 5%:n merkitsevyystasolla (ts. voidaan pitää nollasta eroavana), jos sen itseisarvo on yli 0.062:n.

IRI korreloi selvästi tien kantavuutta kuvaavien muuttujien kanssa, eniten muuttujan TMITKANT kanssa (korrelaatiot vaihtelevat -0.51 – 0.28), joten kantava tie on pituussuuntaisesti tasainen. Heittojen korrelaatiot kantavuusmuuttujien kanssa ovat pienempiä kuin IRI:n korrelaatiot kantavuusmuuttujien kanssa (-0.40 – 0.16).

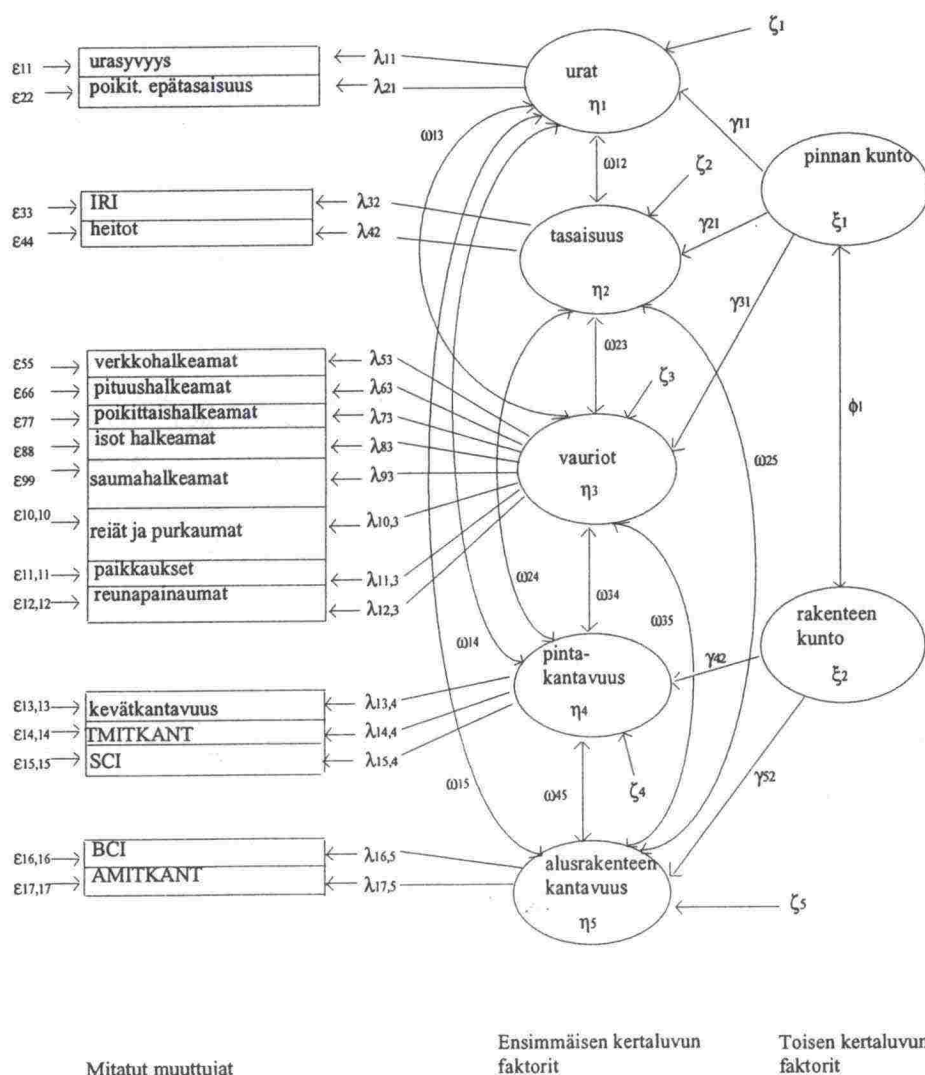
Kaikki yksittäisvauriot (paikkaukset, reiät ja purkaumat, saumahalkeamat ja isot halkeamat) korreloivat keskenään positiivisilla korrelaatioilla, ja ne vaihtelevat 0.1:stä 0.48:aan. Verkkohalkeamat korreloivat selkeästi eniten kantavuusmuuttujien kanssa (-0.41 – 0.28), joten hyvällä kantavalla tiellä ei ole verkkohalkeamia. Muiden vauriomuuttujien korrelaatiot kantavuuden kanssa ovat pienempiä, mutta ne osoittavat, että kantavalla tiellä ei esiinny vaurioita. Poikittaishalkeamien (-0.19 – 0.15) korrelaatiot kantavuusmuuttujien kanssa osoittavat, että niitä esiintyy kantavilla teillä. Vauriomuuttujat korreloivat IRI:n ja heittojen kanssa (0 – 0.24), kuitenkin poikittaishalkeamat korreloivat muista vauriomuuttujista poiketen negatiivisilla korrelaatioilla IRI:n ja heittojen (-0.10 – -0.12) kanssa. Tasaisella tiellä esiintyy poikittaishalkeamia, mutta harvemmin muita vaurioita.

Kantavuusmuuttujien keskinäiset korrelaatiot ovat loogisia ja ne vaihtelevat vain asteikkojen takia negatiivisen ja positiivisen välillä. Laskentatavaltaan läheiset muuttujat TMITKANT ja kevätkantavuus

korreloivat selvästi (0.95). Samoin SCI korreloi TMITKANT:in ja kevätkantavuuden kanssa (-0.79 ja -0.83).

4.5 Mallin spesifikaatio

Tutkimuksen tavoitteena on tuottaa kuvan 4.7 mukaiset kestopäällystetien kuntoa kuvaavat faktorit: urat, tasaisuus, vauriot sekä pinta- ja alusrakenteen kantavuus.



Kuva 4.7: Kestopäällysteiden kunnon LISREL-malli toisen kertaluvun konfirmatorisena faktorianalyysinä.

Mallin riittävyystarkasteluissa tutkitaan kuvassa esitetyn mallin sopivuutta kestopäällystetien kunnon kuvaamiseen. Kunkin kuntomuuttu-

jan oletetaan kuvaavan yhtä tien kuntofaktoria, joten faktorimalli oletetaan konkeneeriseksi mittausmalliksi (ks. lukua 3.3.2). Muuttujan sopivuus faktorin mittaajaksi testataan. Esimerkiksi poikittainen epätasaisuus-muuttuja voisi mitata sekä uria että tasaisuutta, samoin verkkohalkeama voisi mitata sekä vaurioita että kantavuutta.

4.5.1 Ensimmäisen kertaluvun faktorit

Faktorianalyysin periaatteen mukaan ajatellaan, että keskenään korreloivat muuttujat mittaavat samaa ilmiötä. Pahoin vaurioituneessa tiessä on yhtäaikaan monia vaurioita, minkä pitäisi näkyä vaurioiden korrelaatioissa. Esimerkiksi halkeamat, paikat, reiät ym. korreloivat keskenään, ja muuttujien korrelaation ilmaisema ilmiö on vaurioituminen. Faktori on nimeltään vauriot (η_3). Vauriot-faktoriin latautuvat tien vaurioituneisuutta hyvin kuvaavat muuttujat suurilla latauksilla.

Urat-faktori (η_1) kuvaa tien poikittaista epätasaisuutta, joka mitataan urasyvyys- ja poikittainen epätasaisuus -muuttujilla. Faktori selvittää latausten suuruudella tärkeimmät tien poikittaisprofiilin epätasaisuuden muuttujat. Tasaisuus-faktori (η_2) kuvaa tien pituussuuntaista epätasaisuutta, ja siihen yhdistetään kuntomuuttujat IRI ja heitot. Tasaisuus kuvaa osaltaan kuivan tien ajettavuutta. Pintakantavuus-faktori (η_4) kuvaa tien päällysrakenteen yläosien kantavuutta. Muuttuja, jolla λ_{ij} -kerroin on iso, on hyvä päällysrakenteen kantavuuden mittari. Alusrakenteen kantavuus-faktorilla (η_5) etsitään tien päällysrakenteen alaosien ja alusrakenteen kantavuutta hyvin kuvaavia muuttujia.

Faktorianalyysin lineaariset lausekkeet ovat yhtälön (3.13) mukaan seuraavat: (λ_{ij} -kertoimen suuruus ilmaisee muuttujan mittauskyvyn faktorille)

- urasyvyys = λ_{11} * urat + virhe ϵ_{11}
- poikittainen epätasaisuus = λ_{21} * urat + virhe ϵ_{22}
- IRI = λ_{32} * tasaisuus + virhe ϵ_{33}
- heitot = λ_{42} * tasaisuus + virhe ϵ_{44}
- verkkohalkeamat = λ_{53} * vauriot + virhe ϵ_{55}
- pituushalkeamat = λ_{63} * vauriot + virhe ϵ_{66}
- poikkihalkeamat = λ_{73} * vauriot + virhe ϵ_{77}
- isot halkeamat = λ_{83} * vauriot + virhe ϵ_{88}
- saumahalkeamat = λ_{93} * vauriot + virhe $\epsilon_{9,9}$

- reiät ja purkaumat = $\lambda_{10,3} \cdot \text{vauriot} + \text{virhe } \varepsilon_{10,10}$
- paikkaus = $\lambda_{11,3} \cdot \text{vauriot} + \text{virhe } \varepsilon_{11,11}$
- reunapainaukset = $\lambda_{12,3} \cdot \text{vauriot} + \text{virhe } \varepsilon_{12,12}$
- kevätkantavuus = $\lambda_{13,4} \cdot \text{pintakantavuus} + \text{virhe } \varepsilon_{13,13}$
- TMITKANT = $\lambda_{14,4} \cdot \text{pintakantavuus} + \text{virhe } \varepsilon_{14,14}$
- SCI = $\lambda_{15,4} \cdot \text{pintakantavuus} + \text{virhe } \varepsilon_{15,15}$
- BCI = $\lambda_{16,5} \cdot \text{alusrakenteen kantavuus} + \text{virhe } \varepsilon_{16,16}$
- AMITKANT = $\lambda_{17,5} \cdot \text{alusrakenteen kantavuus} + \text{virhe } \varepsilon_{17,17}$

Faktoreja vastaavat kuntomuuttujat lasketaan faktoripistemäärinä (ks. luku 3.3.5). Ne kuvaavat useiden kuntomuuttujien sijaan tien kunnon vähemmällä muuttujamäärällä. Useat muuttujat kuvaavat yhdistettynä paremmin tien tiettyä kuntoisuutta kuin yksittäinen muuttuja. Faktoripistemäärillä saadaan painovakiot, joilla yhden faktorin kuntomuuttujat summataan urat, vaurio-, tasaisuus- sekä pinnan ja alusrakenteen kantavuusmuuttujiksi, jotka ovat seuraavat lineaariset summalausekkeet:

- urat = $\sum_i (a_i \cdot \text{kuntomuuttuja}_i)$
- tasaisuus = $\sum_i (b_i \cdot \text{kuntomuuttuja}_i)$
- vauriot = $\sum_i (c_i \cdot \text{kuntomuuttuja}_i)$
- pintakantavuus = $\sum_i (d_i \cdot \text{kuntomuuttuja}_i)$
- alusrakenteen kantavuus = $\sum_i (e_i \cdot \text{kuntomuuttuja}_i)$.

Kertoimet a_i , b_i , c_i , d_i ja e_i ovat eri kertoimia kuin lataukset λ_{ij} . Faktoripistemäärien lausekkeeseen vaikuttavat eniten kussakin omassa faktorissa olevat muuttujat suuremmilla kertoimilla kuin muissa faktoreissa olevat kuntomuuttujat. Näitä muuttujia voi käyttää analyyseissä normaalisti kyseistä tien kuntoa kuvaavina muuttujina ottaen huomioon luvun 6.3 kommentit standardoiduista kuntomuuttujista. Näitä muuttujia käytetään laskettaessa kuntoindeksejä (liite 4).

4.5.2 Faktoreiden korrelaatiot

Faktoreiden väliset korrelaatiot lasketaan faktorianalyysin symmetriseen kovarianssimatriisiin Ω (5*5-matriisi), joka sisältää sekä faktoreiden varianssit että kovarianssit.

Pintakantavuuden ja urat -faktoreiden välisellä korrelaatiolla (ω_{14}) selviää vaikuttaako tien kantavuus kestopäällystetien poikittaiseen epätasaisuuteen. Tutkittaessa kantavuuden vaikutusta poikittaiseen epätasaisuuteen tulisi huomioda vain rakenteen deformaation osuus urautumisesta, mutta liikennemäärästä, päällysteen tiivistymisestä ja

plastisesta deformaatiosta johtuva urautuminen sekoittuu rakenteen deformaation aiheuttamaan urautumiseen (ks. lukua 2.2.2). Korrelaatio on siis absoluuttisen urasyvyyden korrelaatio kantavuuden kanssa. Kantavuus vaikuttanee myös tien pituussuuntaiseen epätasaisuuteen (ω_{24}). Vauriot-faktorin ja kantavuus-faktorin välinen korrelaatio (ω_{34}) kertoo, esiintyykö yleensä kantavuudeltaan puutteellisilla teillä myös määrällisesti paljon vaurioita. Poikittaisen ja pituussuuntaisen epätasaisuuden sekä vaurioiden korrelaatiot lasketaan myös päällysrakenteen alaosien ja alusrakenteen kantavuuden kanssa (ω_{15} , ω_{25} , ω_{35}). Samoin lasketaan kahden kantavuus-faktorin välinen korrelaatio (ω_{45}), joka kuvaa päällysrakenteen yläosien kantavuuden riippuvuutta tien alempien kerrosten kantavuudesta. Faktoreiden tasaisuus ja urat välinen korrelaatio (ω_{12}) osoittaa, missä määrin teillä on nähtävissä, että poikittainen epätasaisuus esiintyy tien pituussuuntaisen epätasaisuuden yhteydessä. Tien pituussuuntaisella epätasaisuudella ja vaurioitumisella on oletettavasti merkittävää korrelaatiota (ω_{23}), koska molemmat ovat kantavuusriippuvaisia. Faktoreiden urat ja vauriot välinen korrelaatio (ω_{13}) osoittaa, kuinka voimakkaasti poikittainen epätasaisuus esiintyy vaurioiden kanssa.

4.5.3 Toisen kertaluvun faktorit

Ensimmäisen kertaluvun faktoreiden korrelaatioiden avulla muodostetaan kaksi toisen kertaluvun faktoria ξ_1 ja ξ_2 , jotka kuvaavat pinnan ja rakenteen kuntoa. Tien pinnan kunto kuvaa tien ajettavuutta tienkäyttäjän kannalta. Toisen kertaluvun faktoreilla selvitetään, paljonko tien poikittainen ja pituussuuntainen epätasaisuus sekä vaurioituminen vaikuttavat tien pinnan kuntoon. Tien rakenteen kunto muodostuu kahdesta kunto-osasta: päällysrakenteen ja alusrakenteen kestävydestä. Riippuvuudet esitetään faktorianalyysin yhtälöinä seuraavasti:

- $\text{urat} = \gamma_{11} \cdot \text{tien pinnan kunto} + \text{virhe } \zeta_1$
- $\text{tasaisuus} = \gamma_{21} \cdot \text{tien pinnan kunto} + \text{virhe } \zeta_2$
- $\text{vauriot} = \gamma_{31} \cdot \text{tien pinnan kunto} + \text{virhe } \zeta_3$
- $\text{pintakantavuus} = \gamma_{42} \cdot \text{tien rakenteen kunto} + \text{virhe } \zeta_4$
- $\text{alusrakenteen kantavuus} = \gamma_{52} \cdot \text{tien rakenteen kunto} + \text{virhe } \zeta_5$

Toisen kertaluvun faktoreiden välisenä korrelaationa (ϕ_{12}) saadaan selville tien rakenteen ja pinnan kunnon välinen riippuvuus. Toisen kertaluvun faktoreita vastaavat muuttujat lasketaan faktoripistemäärämuuttujien avulla seuraavasti:

- pinnan kunto = $\sum_i (a_i \cdot \text{ensimmäisen kertaluvun faktori})$
- rakenteen kunto = $\sum_i (b_i \cdot \text{ensimmäisen kertaluvun faktori})$.

Pieni tien pinnan kuntoluku osoittaa tien olevan pinnaltaan kunnossa ja sen olevan ajettava. Suurilla luvuilla tien palvelutaso käyttäjille on heikko. Tien rakennemuuttujan pieni arvo osoittaa tien rakenteiden olevan heikkoja.

5 ESTIMOINTI

Edellisen luvun malli on muotoa $y = \Lambda_y(\Gamma\xi + \zeta) + \varepsilon = \Lambda_y\Gamma\xi + \Lambda_y\zeta + \varepsilon$. Toisen kertaluvun mallin osuuden identifioitavuus on osoitettu liitteessä kaksi. Malli estimointiin taulukon 4.6 (Pearsonin) korrelaatiomatriisista ML-estimoinnilla LISREL 7-ohjelmalla. Aluksi muuttujille etsittiin sopivia muunnoksia, jotta ne täyttäisivät normaalijakaumaoletuksen. Vauriomuuttujat dikotomisoitiin ja muuttujien välille laskettiin polykoorisia ja polyseriaalisia korrelaatioita, joiden estimointia yritettiin WLS-menetelmällä (ks. 4.3). Vauriomuuttujien dikotomisointi teki kuitenkin korrelaatiomatriisista ei-positiivisesti definitin, jolloin mallia ei pysty estimoimaan ja yrityksestä oli luovuttava.

Malli on estimoitu ensin ensimmäisen kertaluvun faktoreiden osalta, ja tähän malliin on yhdistetty toisen kertaluvun faktoreiden osuus. Ensimmäisen ja toisen kertaluvun faktoreiden skaalayksikäsitteisyyden takia on kussakin faktorissa kiinnitetty yksi lataus nolasta eroavaksi (estimoiduissa malleissa se on yleensä 0.8). Ensimmäisen kertaluvun faktoreiden skaalayksikäsitteisyyttä ei tehdä kiinnittämällä niiden variansseja ykkösiksi, koska faktoreiden korrelaatioiden avulla lasketaan edelleen toisen kertaluvun faktoreiden lataukset.

Eri kuntomuuttujien mittausvirheet ε_j oletetaan mallissa varianssiltaan erisuuriksi, mutta ne ovat korreloimattomia toisistaan, joten mittausvirheiden $(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \dots, \varepsilon_n)$ kovarianssimatriisi $\Theta_\varepsilon = \text{diag}(\theta_{11}^{(e)}, \dots, \theta_{pp}^{(e)})$ estimoidaan diagonaalisenä. Mallin rakentamista voidaan jatkaa vapauttamalla kuntomuuttujien mittausvirheet keskenään korreloiviksi, jolloin Θ_ε ei ole enää diagonaalinen.

Kestopäällysteteiden kunnan LISREL-malli estimointiin kuvan 4.7 mukaisena mallina, josta saadaan kuvan 6.1 malli. Tästä mallista saadaan kaksi toisen kertaluvun faktoria: tien pinnan ja rakenteen

kunto. Mallista laskettiin aluksi myös versiota, jossa pinnan kunto muodostuu kuten tässäkin mallissa urat-, tasaisuus-, ja vauriot-faktoreista, mutta rakenteen kunto muodostui faktoreista vauriot, päällysrakenteen kantavuus ja alusrakenteen kantavuus. Mallissa vauriot olivat sekä pinnan että rakenteen kunnon kuvaajina. Mallin estimointi ei kuitenkaan tuottanut kelvollisia parametriestimaatteja. (Kyyrä, Olsonen, 1992). Tien yleiskuntoa on tutkittu kuvan (6.3) mallilla, jossa on vain yksi toisen kertaluvun faktori, tien yleiskunto.

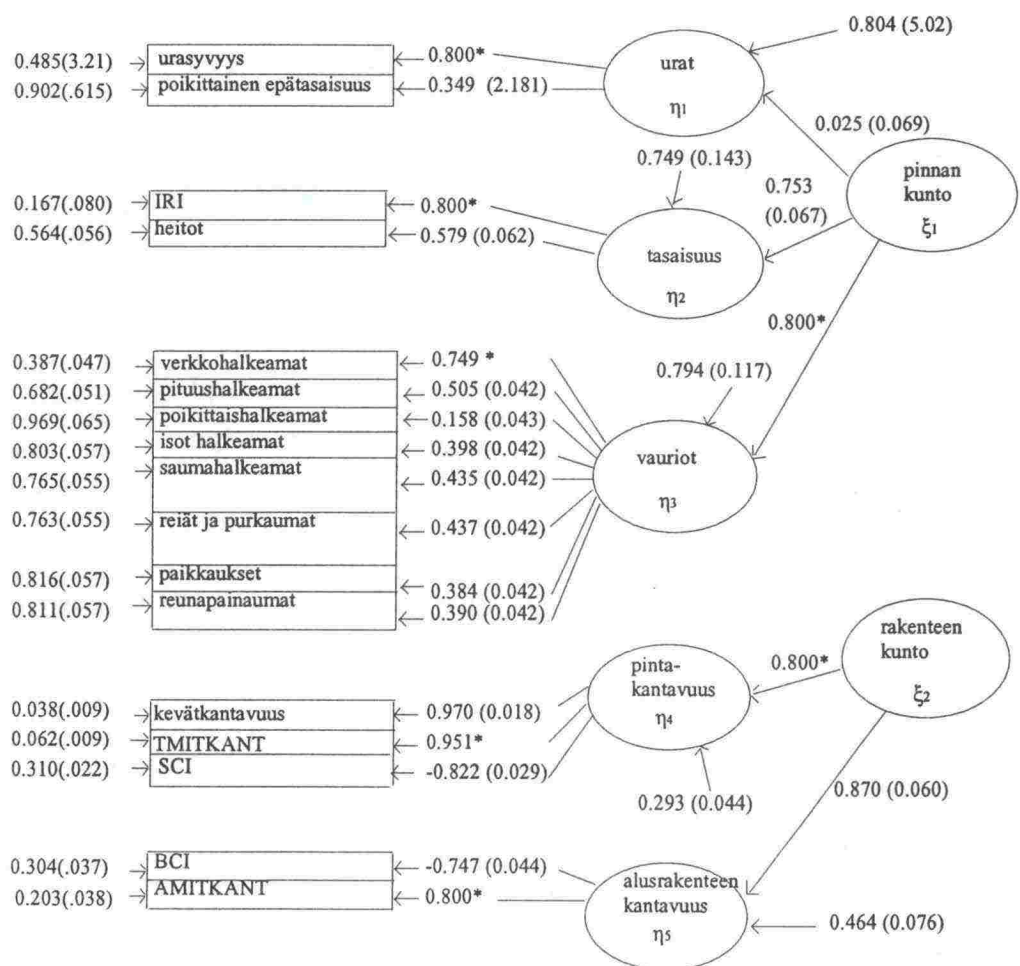
6 TULOKSET

6.1 Malli ja sen tilastollinen riittävyys

Kuvan 6.1 malliin on estimoitu viisi ensimmäisen kertaluvun faktoria ja kaksi toisen kertaluvun faktoria. Tämän mallin tuloksia käsitellään luvuissa 6.2, 6.3, 6.4 ja 6.5. Luvussa 6.6 käsitellään eri mallia, jossa kuvataan tien yleiskunto.

Kuvassa 6.1 olevan mallin riittävyysmitat eivät ole tilastollisesti aivan tyydyttävät. Mallin χ^2 -yhteensopivuustestin arvo 727 ei ole tarpeeksi pieni (pitäisi olla alle mallin vapausteiden 115). Koska suuri otoskoko kasvattaa χ^2 -yhteensopivuusindeksin arvoa, on laskettu myös otoskosta riippumaton testisuure, normeerattu yhteensopivuusindeksi. Sen arvo $\Delta_{01} = [3757(136) - 727(115)] / 3757(136) = 0.81$ ei ole tilastollisesti riittävä (on alle 0.9:n). Muut mallin yleissopivuutta aineiston kanssa kuvaavat testisuureet GFI=0.84 ja AGFI=0.80 ovat tilastollisesti liian pieniä (alle 0.9:n). Kuntomuuttujien kokonaisvaihtelusta on selittämättä 9.8 % (RMR:n arvo on 0.098). Ensimmäisen kertaluvun faktoreiden rakenneyhtälömallin yleistetty selityskerroin eli determinatiokerroin on 100 % ($D(\eta) = 1$), mikä osoittaa ensimmäisen kertaluvun faktoreiden olevan riittävästi kuvattut. Toisen kertaluvun mallin osuuden determinatiokerroin $D(\xi)=0.82$ ei ole riittävä (on alle 0.9).

TULOKSET



Mitatut muuttujat

Ensimmäisen kerta-
luvun faktorit

Toisen kertaluvun faktorit

*Lataus on kiinnitetty.
Keskivirhe on suluissa.

Mallin riittävyysmitat:

 $\chi^2=727$ (df.=115) $\Delta_{01}=0.81$ RMR=0.098 GFI=0.84 AGFI=0.80 $D(\eta)=1.00$ $D(\xi)=0.87$ $R^2(\eta_1)=0.1\%$, $R^2(\eta_2)=43\%$, $R^2(\eta_3)=45\%$, $R^2(\eta_4)=70\%$, $R^2(\eta_5)=62\%$ $\omega_{11}=0.8$ $\omega_{22}=1.3$ $\omega_{33}=1.4$ $\omega_{44}=0.90$ $\omega_{55}=1.2$

Kuva 6.1: Kestopäällysteiden kunnon toisen kertaluvun konfirmatorinen faktori-
malli, jossa on sekä pintakunnon että rakenteen kunnon yleisfaktorit.

Kuvan 6.1 vasemmassa laidassa olevat luvut ovat ϵ -mittausvirheiden varianssit, ja niiden jälkeen ovat keskivirheet suluissa. Kaikkien suluissa olevien keskivirheiden avulla arvioidaan parametrien estimointitarkkuutta. T-testi lasketaan osamääränä (parametrin estimaat-

ti)/keskivirhe, joka testaa onko kyseisen parametrin estimaatti nolla. Pienellä keskivirheellä saadaan pieni luottamusväli parametrille, parametrin arvo vaihtelee välillä $\pm 1.96 \cdot \text{keskivirhe}$ 95 %:n todennäköisyydellä. Mitä pienempi muuttujan mittausvirhe on sitä parempi on muuttujan reliabiliteetti $R_i^2 = (1 - \theta_i / \sigma_i) \cdot 100$ %. Testisuure kertoo, kuinka hyvä faktorin kuvaaja kyseinen muuttuja on, ja testisuure tulkitaan prosenttiluvuksi, joka ilmoittaa muuttujan selityssuhteen faktorille. Nyt esitettävässä mallissa kuntomuuttujien reliabiliteettikertoimet vaihtelevat paljon. Mallia pitäisi modifioida niin, että pienen reliabiliteetti-arvon saaneet muuttujat poistetaan mallista, koska niillä ei pystytä kuvaamaan faktoria. Kyseessä voi toisaalta olla muuttujien kohdalta väärin spesifioitu malli.

Koska yleiset riittävyysmitat eivät osoita mallia täysin sopivaksi aineistoon, muiden riittävyysmittojen perusteella on löydettävä mallin sopimattomuuteen johtavat yksityiskohdat. Mallia voidaan yrittää modifioida riittävyysmittojen perusteella, mutta tässä työssä sitä ei tehty, koska testattiin ensisijaisesti olemassaolevaa mallihypoteesia. Mallin tulkintavaikeudet, mallin spesifisyys ja muuttujien paljous vaikeuttavat lisäksi mallin modifiointia tilastollisten testien perusteella.

6.2 Ensimmäisen kertaluvun faktorit

Ensimmäisen kertaluvun faktorit pystyttiin muodostamaan ennakkokäsitystä vastaavilla kuntomuuttujilla. Kussakin faktorissa kuntomuuttujien mittauskykyä faktorille arvioidaan suhteellisten faktorilatausten avulla. Yksi kunkin faktorin latauksista on kiinnitetty yleensä 0.8:ksi. Kiinnitetyt lataukset on merkitty tähdellä kuvioihin 6.1 ja 6.3. Muut faktorin lataukset estimoituvat suhteessa tähän kiinnitettyyn lataukseen. Muuttuja, jolla on itseisarvoltaan iso lataus, on hyvä faktorin kuvaaja.

Urat-faktorin muodostumisessa on selviä ongelmia, sitä ei ole kuvattu tyydyttävästi urasyvyyden ja poikittaisen epätasaisuuden -muuttujilla. Muuttujien latauksilla on suuret keskivirheet, joten parametrien estimointi on ollut hyvin epätarkkaa. T-testin arvo ($0.349/2.181=0.16$) on alle 1.96:n, joten poikittaisen epätasaisuuden -muuttujalla ei voida mitata kestopäällystetien poikittaista epätasaisuutta. Reliabiliteettikerroin osoittaa, että urat-faktoriin pystytään liittämään vain 9.8 % poikittaisen epätasaisuus -muuttujan vaihtelusta. Poikittainen epätasaisuusmuuttuja ei toimi poikittaisen epätasaisuuden indikaattorina kestopäällystetiellä ja se tulee poistaa mallista. Urasyvyyden reliabili-

teetti on 52 %. Kestopäällystetien poikittainen epätasaisuus kuvataan vain urasyvyydellä.

Tien pituussuuntainen epätasaisuus pystytään mittaamaan paremmin muuttujalla IRI kuin heitoilla, faktorilataukset ovat 0.8 ja 0.6. Latausten keskivirheetkin ovat riittävän pieniä, joten t-testien mukaan lataukset ovat nollasta eroavia. Reliabiliteetit ovat 83% ja 44 %, joten IRI:n ja heittojen vaihtelusta hyödynnetään tämän verran tien pituussuuntaisen epätasaisuuden mittauksessa.

Tien vaurioitumista kuvataan parhaiten verkkohalkeamilla. Seuraavana ovat melkein tasavertaisesti muut vauriomuuttujat. Pienin kerroin on poikittaishalkeamilla, lataus on kuitenkin t-testin perusteella nollasta eroava (0.158/0.043 on yli 1.96:n), joten poikittaishalkeamakin voidaan pitää vaurioitumisen indikaattorina. Poikittaishalkeamilla on pienin reliabiliteettiarvo (3.5 %), joten sillä on vähiten mittaussykyä tien vaurioitumiselle. Muilla vauriomuuttujilla reliabiliteetit ovat seuraavat: verkkohalkeamat 67 %, pituushalkeamat 35 %, isot halkeamat 22 %, saumahalkeamat 26 %, reiät ja purkaumat 26 % ja paikat 21 %. Tämän verran muuttujien vaihtelusta voidaan siirtää tien vaurioitumisen kuvaamiseen.

Kevätkantavuus ja tien mitoittava kevätkantavuus (TMITKANT) ovat yhtä hyviä päällysrakenteen yläosien kantavuutta kuvaavia muuttujia, lataukset ovat 0.97 ja 0.95. Pienin lataus -0.822 on päällysrakenteen kuntoluvulla SCI. Nämä muuttujat on kuvattu tarkimmin mallissa, koska niillä on mallin pienimmät mittausrvirheet ja virheiden keskihajonnat ovat myös pieniä. Tällöin muuttujien luotettavuudet eli reliabiliteetit ovat korkeita: SCI:lle 67 %, TMITKANT:lle 93 % ja kevätkantavuudelle 96 %.

Päällysrakenteen alaosien ja alusrakenteen kantavuusmuuttujista alusrakenteen mitoittava kevätkantavuus (AMITKANT) on vain vähän parempi kantavuusmuuttuja kuin alusrakenteen kuntoluku BCI, lataukset ovat 0.800 ja -0.747. Kantavuusmuuttujien reliabiliteetit osoittavat, että näiden muuttujien vaihtelusta voidaan hyödyntää tien päällysrakenteen alaosien ja alusrakenteen kantavuuden kuvaamiseen 79 % (AMITKANT) ja 69 % (BCI). Muuttujilla pystytään kuvaamaan hyvin alusrakenteen kantavuus.

Modifikaatioindeksillä tutkitaan lisälatausten tarvetta malliin. Malli on pakotettu nyt konkeneeriseksi mittaussmalliksi, jossa kukin muuttuja

vaikuttaa suoraan vain yhteen faktoriin (faktoreiden korrelaatioiden takia on lisäksi epäsuoraa vaikutusta). Tämän oletuksen oikeellisuutta tutkitaan modifikaatioindeksillä. Poikittaishalkeamilla esiintyy muita vauriomuuttujista poiketen suuri modifikaatioindeksin arvo pintakantavuuden faktorilla. Poikittaishalkeama esiintyy kantavilla teillä ja sitä voidaan pitää indikaattorina hyvälle tien päällysrakenteen kantavuudelle. Vauriomuuttujilta pitäisi siis vapauttaa suoria latauksia kantavuusfaktoreille. Lisäksi modifikaatioindeksien arvot osoittavat, että TMITKANT:n lataus tasaisuus- ja vauriot -faktorille tulisi vapauttaa, joten TMITKANT mittaa kyseisiä faktoreita pintakantavuuden lisäksi. Vastaavaa ei ilmene muilla kantavuusmuuttujilla, ei edes kevätkantavuudella. Lisäksi pintakantavuuden muuttujat TMITKANT ja SCI olisivat latautuneet myös alusrakenteen kantavuusfaktorille. Herää kysymys, olisiko pintakantavuus- ja alusrakenteen kantavuus-faktorit syytä yhdistää vain yhdeksi kantavuus-faktoriksi. Modifikaatioindeksin perusteella kantavuusmuuttujien jako kahdeksi eri kantavuusfaktoriksi ei ole selkeä. Tämä tarkoittaisi, että kantavuusfaktoreiden välinen korrelaatio olisikin yksi eikä mallin antama korrelaatio 0.652 (kuva 6.1). Kuitenkaan alusrakenteen muuttujilla AMITKANT ja BCI ei ole modifikaatioindeksien perusteella mittaussykyä pintakantavuuden faktorille. Alusrakenteen kestävyys vaikuttaa päällysrakenteen kantavuuden mittaustuloksiin, mutta ei päinvastoin.

Normalisoidulla residuaalilla arvioidaan, onko kahden muuttujan välinen korrelaatio kuvattu riittävän hyvin mallissa. Muuttujien mittausrvirheiden välillä on toistaiseksi oletettu olevan diagonaalinen korrelaatiomatriisi, jolloin muuttujien välisellä mittausrvirheillä ei ole sallittu korrelaatioita. Nyt kuitenkin osoittautuu, että diagonaalisuudesta tulisi luopua, koska isoja (arvo yli kahden) normalisoituja residuaaleja esiintyy toisaalta vauriomuuttujien ja toisaalta kantavuusmuuttujien välillä. Suuria normalisoidun residuaalin arvoja on muuttujien AMITKANT ja SCI, kevätkantavuus ja SCI sekä kevätkantavuuden ja TMITKANT:in välisillä mittausrvirheillä. Tällöin näiden muuttujien väliset mittausrvirheet korreloivat keskenään. Poikittais- ja pituushalkeaman mittausrvirhe korreloi saumahalkeaman mittausrvirheen kanssa. Samoin verkkohalkeaman ja isojen halkeamien mittausrvirheet korreloivat. Muuttujien syntytavassa ja mittauksessa on keskenään korreloivia tekijöitä, jotka aiheuttavat yhteistä mallitusvirhettä.

Edellä selostetun perusteella pitäisi spesifioida uusi malli, joka poistaa mallista isot normalisoitujen residuaalien ja modifikaatioindeksien

arvot. Eniten mallin riittämättömyyteen vaikutti TMITKANT-muuttujan suuret modifikaatioindeksin arvot pituussuuntaiselle epätasaisuudelle, vaurioille ja alusrakenteen kantavuudelle, mikä osoittaa TMITKANT:lla olevan mittauskykyä myös muille faktoreille eikä vain omalle pintakantavuus-faktorille. Suuria normalisoituja residuaaleja voi poistaa luopumalla kovarianssimatriisin Θ_e diagonaalisuudesta. Kaikkien lisälatausten vapauttaminen ei ole kuitenkaan mielekästä mallin ja kuntoindeksien sekä faktoreiden välisten korrelaatioiden tulkinnan kannalta. Malliin tulisi liikaa estimoitavia parametreja, jolloin mallin identifioituvuus tulisi ongelmaksi, ja mallia ei välttämättä pystyisi edes estimoimaan. Poistamalla urat-faktori mallista χ^2 -yhteensopivuustestin arvo saatiin laskemaan, mutta ei riittävästi tilastollisesti hyväksyttävään malliin.

6.3 Kuntoindeksit

Kustakin faktorista muodostetaan uusi kuntomuuttuja faktoripistemäärien avulla. Seuraavat lausekkeet muodostavat muuttujat poikittaiselle epätasaisuudelle, pituussuuntaiselle epätasaisuudelle, vaurioille sekä päälysrakenteen yläosien kantavuudelle että päälysrakenteen alaosien ja alusrakenteen kantavuudelle:

- urat = $0.611 \cdot \text{urasyvyys} + 0.143 \cdot \text{poikittainen epätasaisuus} + 0.03 \cdot \text{IRI} + 0.001 \cdot \text{heitot} + 0.002 \cdot \text{verkkohalk.} + 0.001 \cdot \text{pituushalk.} - 0.002 \cdot \text{TMITKANT} - 0.002 \cdot \text{kevätkantavuus} + 0.001 \cdot \text{BCI} - 0.002 \cdot \text{AMITKANT}$
- tasaisuus = $0.874 \cdot \text{IRI} + 0.187 \cdot \text{heitot} + 0.024 \cdot \text{verkkohalk.} + 0.009 \cdot \text{pituushalk.} + 0.002 \cdot \text{poikittaishalkeamat} + 0.006 \cdot \text{isot halkeamat} + 0.007 \cdot \text{saumahalkeamat} + 0.007 \cdot (\text{reiät ja purkaumat}) + 0.006 \cdot \text{reunapainaukset} + 0.006 \cdot \text{paikat} - 0.023 \cdot \text{TMITKANT} - 0.037 \cdot \text{kevätkantavuus} + 0.004 \cdot \text{SCI} + 0.015 \cdot \text{BCI} - 0.025 \cdot \text{AMITKANT}$
- vauriot = $0.059 \cdot \text{IRI} + 0.013 \cdot \text{heitot} + 0.497 \cdot \text{verkkohalkeamat} + 0.190 \cdot \text{pit.halkeamat} + 0.042 \cdot \text{poikit.halkeamat} + 0.127 \cdot \text{isot halkeamat} + 0.146 \cdot \text{saumahalkeamat} + 0.147 \cdot (\text{reiät ja purkaumat}) + 0.123 \cdot \text{reunapainaukset} + 0.121 \cdot \text{paikkaukset} - 0.051 \cdot \text{kevätkantavuus} - 0.031 \cdot \text{TMITKANT} + 0.005 \cdot \text{SCI} + 0.021 \cdot \text{BCI} - 0.034 \cdot \text{AMITKANT}$
- pintakantavuus = $-0.007 \cdot \text{IRI} - 0.002 \cdot \text{heitot} - 0.004 \cdot \text{verkkohalkeamat} - 0.002 \cdot \text{pit.halkeamat} - 0.001 \cdot \text{isot halkeamat} - 0.001 \cdot \text{saumahalkeamat} - 0.001 \cdot (\text{reiät ja purkaumat}) - 0.001 \cdot \text{reunapainaukset} - 0.001 \cdot \text{paikkaukset} - 0.584 \cdot \text{kevätkantavuus} + 0.356 \cdot \text{TMITKANT} - 0.061 \cdot \text{SCI} - 0.008 \cdot \text{BCI} + 0.013 \cdot \text{AMITKANT}$
- alusrakenteen kantavuus = $-0.030 \cdot \text{IRI} - 0.006 \cdot \text{heitot} - 0.017 \cdot \text{verkkohalk.} - 0.006 \cdot \text{pit.halkeamat} - 0.001 \cdot \text{poikit.halkeamat} - 0.004 \cdot \text{isot halkeamat} - 0.005 \cdot \text{saumahalkeamat} - 0.005 \cdot (\text{reiät ja purkaumat}) - 0.004 \cdot \text{reunapainaukset} - 0.004 \cdot \text{paikkaukset} + 0.084 \cdot \text{kevätkantavuus} + 0.051 \cdot \text{TMITKANT} - 0.009 \cdot \text{SCI} - 0.379 \cdot \text{BCI} + 0.609 \cdot \text{AMITKANT}$

Muuttujassa on faktorin sisältämä informaatio tien kunnosta. Suurimmat kertoimet ovat faktorien omilla kuntomuuttujilla, mutta faktorei-

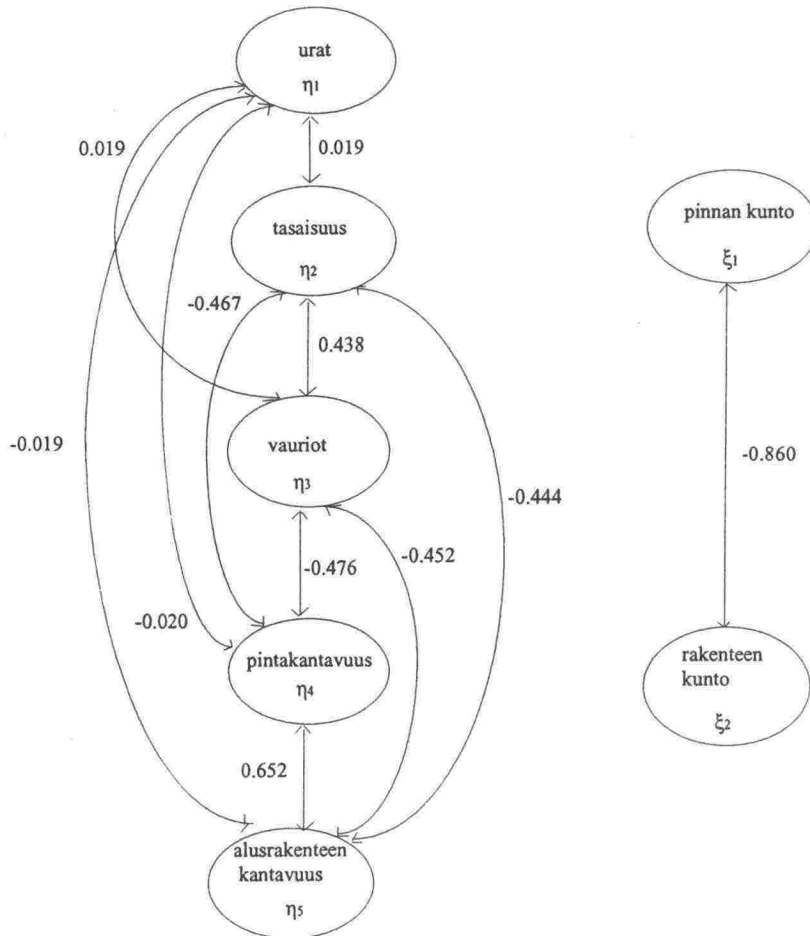
den korrelaatioiden takia pienempiä kertoimia esiintyy muidenkin faktoreiden kuntomuuttujilla.

Faktoripistemääräkertoimet on laskettu käyttäen kuntomuuttujien tieosakohtaisia keskiarvoja logaritmoituna ja standardoituna (keskiarvoon nolla ja keskihajontaan yksi kaavalla (muuttuja-keskiarvo) / keskihajonta). Kaava tuottaa uuden keskiarvoltaan nolla ja keskihajonnaltaan yksi olevan kuntomuuttujan, jota voidaan skaalata halutulle vaihteluvälille keskiarvon ja keskihajonnan määräämisen avulla.

Koska faktoripistemäärät on laskettu transformoiduista muuttujista ja kuntoindeksit halutaan laskea alkuperäisten muuttujien avulla, kuntoindeksit lasketaan lineaarisella regressiolla, jossa faktoripistemäärää käytetään regressiomallin selitettävänä muuttujana ja alkuperäiset transformoimattomat kuntomuuttujat ovat selittäviä muuttujia. Jotta kuntoindeksi saadaan halutulle vaihteluvälille (nollasta sataan), on faktoripistemäärä ensin skaalattu nollan ja sadan välille. Tätä muuttujaa selitetään regressioanalyysissä sadan metrin transformoimattomilla kuntotiedoilla. Liitteessä 4 on esitetty kuntoindeksit. Ura-, tasaisuus- ja vaurio-indeksissä pienet arvot osoittavat tien olevan hyväkuntoinen, kun kantavuusindekseissä isot arvot osoittavat tien olevan hyväkuntoinen. Kuntoindeksien arvot riippuvat muuttujien yksiköistä (desimaalitarkkuus), halutusta indeksin vaihtelualueesta (nyt nollasta sataan) ja käytetystä aineistosta (indeksit eivät pysy arvoltaan alle sadan, jos indeksin muuttujiin sijoitetaan isompia arvoja kuin mitä on liitteen 4 taulukossa). Indeksit voidaan tarvittaessa skaalata muullekin mielekkäälle vaihtelualueelle. Vaurioindeksiä on erityisen hankala skaalata, koska vauriomuuttujat ovat jakaumaltaan vinoja. Indeksien arvoa on hyvin vaikea skaalata esimerkiksi nollasta sataan, koska suurin osa indeksin arvoista vaihtelee tällä välillä, mutta erityisen vaurioituneelle tielle indeksin arvo kasvaa jyrkästi. Nykyinenkin vauriosumman lauseke saa arvoja nollasta kahdeksaansataan, mutta vaurioiltaan huonona tienä raportoidaan jo arvon 30, 60 tai 70 ylittävä tie. Lausekkeessa voisi käyttää kuntomuuttujien logaritmoitua, joka estäisi vauriomuuttujien suuria arvoja nostamasta indeksin arvoa kohtuuttomasti.

6.4 Faktoreiden korrelaatiot

Kuvassa 6.2 on esitetty estimoidun mallin faktoreiden väliset korrelaatiot.



Kuva 6.2: Ensimmäisen ja toisen kertaluvun faktoreiden väliset korrelaatiot.

Urat-faktori ei korreloi muiden faktoreiden kanssa. Korrelaatiot ovat lähes nollia, eli poikittaisen epätasaisuuden korrelaatiota muiden faktoreiden kanssa ei pystytä osoittamaan. Urat-faktoria kuvaavien muuttujien urasyvyys ja poikittainen epätasaisuus mittauksessa on ongelmia, tai syy on urien kohdalta väärin spesifioitu malli. Yksi väärän spesifikaation mahdollinen aiheuttaja on liikennemäärän huomiottajättäminen tutkimuksessa. Liikennemäärällä skaalaaminen on hankalaa, koska liikennemäärä lisää urautumista, mutta toisaalta vähentää pituussuuntaista epätasaisuutta ja vaurioita. Vilkasliikenteelle tielle syntyy kulutusuria, erityisesti nastoista, mutta rakenteeltaan kestäväällä tiellä IRI on pieni ja tiheistä uudelleenpäälystämistä johtuen vaurioita ei esiinny. Vaurioinventointi tehdään jo vaurioituneeksi tiedetyille tielle, jolla liikennemäärä on pieni ja päälystysväli harva, mutta uria ei ole. Tämä edistää uran nollakorrelaatiota muiden

TULOKSET

faktoreiden välillä. Urautumisprosessi keskeytetään päällystyksillä, jolloin tie ei ehdi vaurioitua.

Pituussuuntainen epätasaisuus korreloi pintakantavuuden ja alusrakenteen kantavuus -faktoreiden kanssa lähes yhtä voimakkaasti korrelaatioilla -0.467 ja -0.444. Vauriot-faktori korreloi pinta- ja alusrakenteen kantavuusfaktoreiden kanssa korrelaatioilla -0.476 ja -0.452. Pituussuuntaisen epätasaisuuden ja vaurioiden välinen korrelaatio 0.438 selittyy faktoreiden kantavuusriippuvuudesta ja vaurioiden vaikutuksesta IRI:n arvoon. Pinta- ja alusrakenteen kantavuusfaktoreiden korrelaatio 0.652 osoittaa, että päällysrakenteen alaosien ja alusrakenteen kantavuus vaikuttaa päällysrakenteen yläosien kantavuuteen.

Kaikenkaikkiaan vaurioiden ja pituussuuntaisen epätasaisuuden korrelaatiot kantavuuden kanssa osoittautuvat hyvin merkittäviksi ja yhtäsuuriksi. Päällysrakenteen ja alusrakenteen kantavuuksien välinen korrelaatio on myös erittäin merkitsevä. Poikittaisen epätasaisuuden korreloituneisuutta muihin faktoreihin ei ilmennyt.

6.5 Pinnan ja rakenteen kunto

Kestopäälystetien kunnan kuvausjärjestelmä sisältää myös tien yleiskuntoa kuvaavat käsitteet, jotka ovat pinnan ja rakenteen kunto. Ne yhdistävät kuntomuuttujat faktorianalyysin mukaisilla painoilla muuttujien tien kunnolle olevan merkityksen perusteella.

Toisen kertaluvun faktoreista (kuva 6.1) nähdään, että tien pintakunnolle tärkein kuntotekijä on vauriot, mutta yhtä tärkeänä voidaan pitää tien tasaisuutta (lataukset 0.800 ja 0.753). Vaurioiden vaihtelusta 45 % vaikuttaa pintakuntoon ja pituussuuntaisen epätasaisuuden vaihtelusta 43 % vaikuttaa pintakuntoon (faktorin reliabiliteetti). Poikittaisen epätasaisuuden vaihtelusta vain 0.1 % vaikuttaa tien pintakuntoon. Tämä on seurausta siitä, että urat-faktori ei korreloi vauriot- ja tasaisuus -faktoreiden kanssa (luku 6.4). Poikittainen epätasaisuus ei esiinny tiellä yhtä aikaa vaurioiden ja pituussuuntaisen epätasaisuuden kanssa.

Päällysrakenteen alaosien ja alusrakenteen kantavuus merkitsee tien rakenteen kunnolle enemmän kuin päällysrakenteen yläosien kantavuus (lataukset 0.800 ja 0.870). Käytettyjen päällysrakenteen yläosien kantavuusmuuttujien (kevätkantavuus, TMITKANT ja SCI) vaihtelusta vaikuttaa tien rakenteen kuntoon 70 %. Vastaavasti päällysrakenteen

kenteen alaosien ja alusrakenteen muuttujien (AMITKANT ja BCI) vaihtelu vaikuttaa rakenteen kuntoon 60 %. Tien rakenteen kuntoon vaikuttavat pintakantavuus ja alusrakenteen kantavuus merkittävästi. Jos tien rakenteen kunto on huono, siihen ovat vaikuttaneet sekä alusrakenteen kantavuus että pintakantavuus.

Pinnan ja rakenteen kuntofaktorit korreloivat voimakkaasti keskenään korrelaatiolla -0.86 (kuva 6.2). Kestopäällystetien kantavuuspuutteet näkyvät tien pintakunnossa.

Toisen kertaluvun faktoreiden faktoripistemäärinä saadaan yleiskuntoa kuvaavat kaksi muuttujaa tien rakenteen ja pinnan kunnolle seuraavasti:

- pinnan kunto = $0.008 \cdot \text{urat} + 0.252 \cdot \text{tasaisuus} + 0.253 \cdot \text{vauriot}$
 $-0.296 \cdot \text{pintakantavuus} - 0.203 \cdot \text{alusrakenteen kantavuus}$
- rakenteen kunto = $-0.003 \cdot \text{urat} - 0.109 \cdot \text{tasaisuus} - 0.109 \cdot \text{vauriot}$
 $+0.484 \cdot \text{pintakantavuus} + 0.332 \cdot \text{alusrakenteen kantavuus}.$

Urat-faktori ei vaikuta tien pinnan ja rakenteen kuntoon. Tien pinnan ja rakenteen kuntoindeksit muodostetaan näistä muuttujista samoin kuin muut kuntoindeksit (luku 6.3 ja liite 4).

6.6 Tien yleiskunto

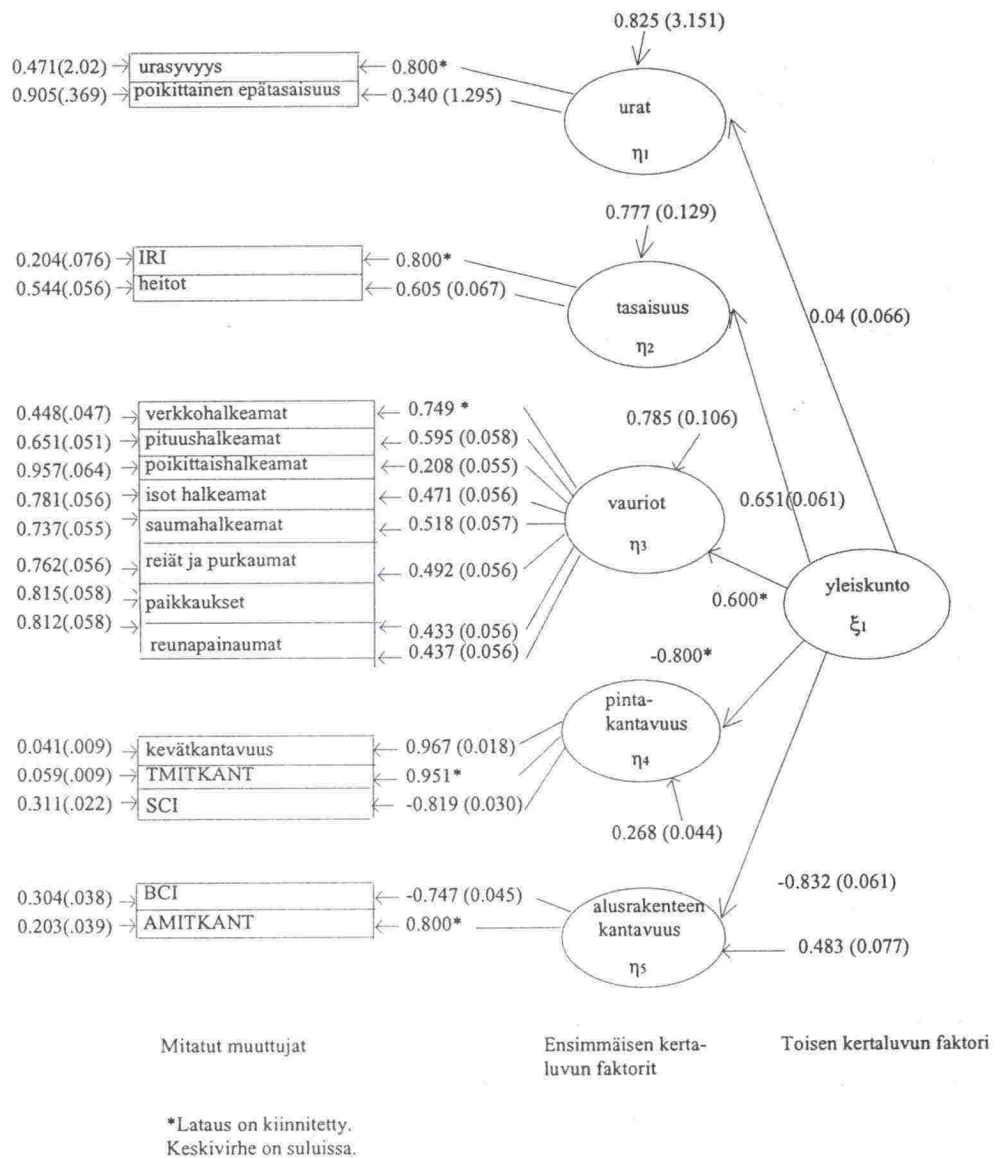
Edellä esitettyä mallia ei voida modifioida identifioitumattomuuden takia niin, että kahdesta toisen kertaluvun faktorista - pinnan ja rakenteen kunnosta - muodostettaisiin yksi yleiskuntofaktori. Sen sijaan on tehty uusi malli, joka sisältää yhden toisen kertaluvun faktorin, joka on nimetty tien yleiskunnoksi. Tässä mallissa verrataan keskenään kaikkia ensimmäisen kertaluvun faktoreita (kuva 6.3).

Mallin yleiset riittävyysmitat eivät ole tilastollisesti merkitseviä. Mallin sopivuutta aineiston kanssa voidaan parantaa poistamalla urat-faktori mallista kokonaan. Tällöin χ^2 -arvo laskee 702(df.=115):stä 485 (df.=74):een, jolle normeerattu yhteensovitusindeksi on $\Delta_{01} = [3530(91) - 485(74)] / 3530(91) = 0.86$, joka ei edelleenkään ole vielä riittävä.

Tässä mallissa on samoja ongelmia kuin kuvan 6.1 mallissa. Malliin pitäisi asettaa lisälatauksia joillekin muuttujille, ja suurien modifikaatioindeksien arvojen perusteella joidenkin kantavuus- ja vauriomuuttujien mittausvirheiden (toistaiseksi nolaksi oletettuja) kovariansseja tulisi vapauttaa. Muutosten tekeminen on kuitenkin vaikeaa identifioi-

TULOKSET

tuvuuden takia, koska estimoitavien parametrien määrä kasvaa ja niitä ei voida estimoida yksikäsitteisenä.



Mallin riittävyysmitat:

$$\chi^2=702 \text{ (df.=115)} \Delta_{01}=0.81 \text{ RMR}=0.086 \text{ GFI}=0.84 \text{ AGFI}=0.80$$

$$D(\eta)=1.0 \text{ } D(\xi)=0.82$$

$$R^2(\eta_1)=0 \%, R^2(\eta_2)=35\%, R^2(\eta_3)=20\%, R^2(\eta_4)=70 \%, R^2(\eta_5)=60 \%$$

$$\omega_{11}=0.8 \omega_{22}=1.2 \omega_{33}=0.97 \omega_{44}=0.90 \omega_{55}=1.2$$

Kuva 6.3: Kestopäällysteteiden kunnon toisen kertaluvin faktorimalli, jossa on yksi toisen kertaluvin faktori nimeltään tien yleiskunto.

Päällysrakenteen alakerrosten ja alusrakenteen kantavuus vaikuttaa eniten tien yleiskuntoon. Päällysrakenteen yläkerrosten kantavuus vaikuttaa lähes samalla merkittävyydellä (lataukset -0.832 ja -0.800). Pienemmät lataukset ovat pintakuntoa kuvaavilla pituussuuntaisella epätasaisuudella ja vaurioilla (latauksilla 0.650 ja 0.600). Tämä poikkeaa edellisestä mallista, jossa osoitettiin, että vauriot ovat tasaisuutta merkittävämpiä tien pintakuntoa arvioitaessa. Pintakantavuuden vaihtelusta 70 % vaikuttaa tien yleiskuntoon. Päällysrakenteen alosien ja alusrakenteen vaihtelusta vaikuttaa 59 % tien yleiskuntoon. Vastaavasti pituussuuntaisen epätasaisuuden vaihtelusta 35% vaikuttaa tien yleiskuntoon ja vaurioiden vaihtelusta 25 % vaikuttaa tien yleiskuntoon. Poikittaisen epätasaisuuden vaihtelu ei vaikuta tien yleiskuntoon, koska urat-faktorin lataus on vain 0.04 ja reliabiliteetti 0 %. Kun arvioidaan tien yleiskuntoa, tulee ensisijaisesti huomioida tien kantavuus yhtä paljon päällysrakenteen alaosista ja yläosista ja vasta tämän jälkeen arvioida pinnalta näkyvät puutteet.

Tien yleiskunnon faktoripistemäärämuuttuja painottaa eniten kantavuuteen liittyviä faktoreita:

$$\begin{aligned} - \text{ tien yleiskunto} &= 0.008 \cdot \text{urat} + 0.149 \cdot \text{tasaisuus} + 0.099 \cdot \text{vauriot} \\ &\quad - 0.533 \cdot \text{pintakantavuus} - 0.307 \cdot \text{alusrakenteen kantavuus.} \end{aligned}$$

Tien yleiskuntoindeksi muodostetaan tästä muuttujasta samoin kuin muut kuntoindeksit (luku 6.3 ja liite 4).

7 YHTEENVETO

Tutkimuksessa rakennettiin kestopäällystetien kunnon kuvaamiseksi kaksi LISREL-mallia toisen kertaluvun konfirmatorisena faktorianalyysinä. Tällainen malli mahdollistaa pinnan ja rakenteen kunnon (kuva 6.1) ja toisaalta yleiskunnon mallittamisen (kuva 6.3). Kestopäällystetien kuntomuuttujat eritellään viiteen kuntomuuttujaryhmään, jotka nimetään seuraavasti: urat, tasaisuus, vauriot, pintakantavuus ja alusrakenteen kantavuus. Ne kuvaavat tien poikittaista epätasaisuutta, pituussuuntaista epätasaisuutta, vaurioita, päällysrakenteen yläosien kantavuutta ja yhdistettynä päällysrakenteen alaosien ja alusrakenteen kantavuutta. Mallilla tutkitaan kestopäällystetien kuntomuuttujien mittaushuippu ja reliabiliteettiä. Kestopäällystetien eri kuntomuuttujaryhmien välille lasketaan riippuvuudet (korrelaatiot) ja

käytännön sovellutuksena on muodostettu kaikkiaan kahdeksan kuntoindeksiä.

Työ perustuu vuoden 1991 kestopäällysteteiden kuntomittauksiin, joita on käytettävissä 1557 kilometriltä. Aineisto ei välttämättä kuvaa koko tieverkkoa, koska mittausmenetelmät ohjaavat aineiston muodostumista. Aineisto edustaa vaurioiltaan tavallista huonokuntoisempaa tieverkkoa. Jakaumaltaan vinojen vauriomuuttujien takia faktorianalyysin teoriaoletus multinormaalijakaumasta ei ole täysin voimassa, mikä on osaltaan syynä mallien tilastolliseen riittämättömyyteen.

Muodostettujen kuntomuuttujaryhmien perusteella voidaan tehdä päätelmiä kuntomuuttujien mittauskyvystä kestopäällystetiellä. Urasyvyys kuvaa parhaiten poikittaista epätasaisuutta. Urasyvyys- ja poikittainen epätasaisuus -muuttujat osoittautuvat osittain ongelmallisiksi tien poikittaisen epätasaisuuden kuvaajiksi suurien mittausvirheiden takia. Pituussuuntaista epätasaisuutta mittaa parhaiten IRI (International Roughness Index). Verkkohalkeamat kuvaavat parhaiten tien vaurioitumista. Parhaat päällysrakenteen yläosien kantavuusmuuttujat ovat kevätkantavuus ja tierakenteen mitoittava kevätkantavuus (TMITKANT). Alusrakenteen mitoittava kevätkantavuus (AMITKANT) ja alusrakenteen kuntoluku (BCI) ovat lähes yhtä hyviä päällysrakenteen alaosien ja alusrakenteen kantavuusmuuttujia.

Jakoa viiteen kuntomuuttujaryhmään tutkittiin. Poikittaishalkeamilla esiintyy mittauskykyä pintakantavuudelle. Tierakenteen mitoittavalla kevätkantavuudella (TMITKANT) on nähtävissä selkeästi mittauskykyä vaurioille ja pituussuuntaiselle epätasaisuudelle toisin kuin muilla kantavuusmuuttujilla, esimerkiksi kevätkantavuudella. Pintakantavuuden muuttujat TMITKANT ja SCI mittaavat myös alusrakenteen kantavuutta. Kantavuusmuuttujien jako kahdeksi eri kantavuusmuuttujaryhmäksi ei ole selkeä, vaan pinta- ja alusrakenteen kantavuus voitaisiin ajatella yhdistettävän yhdeksi kantavuusmuuttujaryhmäksi. Kuitenkaan alusrakenteen muuttujilla AMITKANT ja BCI ei ole mittauskykyä pintakantavuuden faktorille. Alusrakenteen kestävyys vaikuttaa päällysrakenteen kantavuuden mittaustuloksiin, mutta ei päinvastoin.

Tien eri kuntomuuttujaryhmät korreloivat voimakkaasti keskenään. Kestopäällystetien kantavuuspuutteet näkyvät tien pituussuuntaisena epätasaisuutena ja vaurioitumisena. Tien poikittaisen epätasaisu-

den riippuvuutta muista kuntomuuttujaryhmistä ei pystytty osoittamaan. Liikennemäärää ei toistaiseksi huomioitu mallin rakentamisessa.

Tien pintakuntoon vaikuttaa vaurioiden vaihtelusta 45 % ja pituussuuntaisen epätasaisuuden vaihtelusta 43 %. Poikittaisen epätasaisuuden (urasyvyys- ja poikittainen epätasaisuus -muuttujat) vaihtelusta vain 0.1 % vaikuttaa tien pintakuntoon. Päälysrakenteen yläosien kantavuusmuuttujien (kevätkantavuus, TMITKANT ja SCI) vaihtelusta 70 % vaikuttaa rakenteen kuntoon. Vastaavasti päälysrakenteen alaosien ja alusrakenteen muuttujien (AMITKANT ja BCI) vaihtelusta 60 % kuvaa rakenteen kuntoa. Tien pinnan ja rakenteen kunnon välinen korrelaatio -0.86 osoittaa, että tien rakenteen kunto on ratkaiseva tien pinnan kunnolle. Päälysrakenteen ja alusrakenteen kantavuusominaisuudet osoittautuivat merkityksellisemmiksi myös kestopäälystetien yleiskunnolle kuin vauriot ja tasaisuus. Tutkimus osoittaa kantavuuden keskeisen merkityksen tien kunnolle.

Tien kunnon kuvaamiseksi muodostettiin kahdeksan tien kuntoindeksiä: urat, tasaisuus, vauriot, päälysrakenteen yläosien kantavuus, yhdistetty päälysrakenteen alaosien ja alusrakenteen kantavuus sekä pinnan kunto, rakenteen kunto ja tien yleiskunto (liite 4). Kuntoindeksi tiivistää kaikkien ryhmänsä kuntomuuttujien informaation. Näihin kuntoindekseihin kuuluvien kuntomuuttujien painotus perustuu tilastolliseen malliin.

LISREL-malli osoittautui soveliaaksi menetelmäksi kuntomuuttujien analysointiin. Mallin avulla on voitu muodostaa rakenteellinen kuvaus kuntomuuttujien keskinäisistä suhteista, tutkia muuttujien luotettavuutta ja painoarvoa sekä muodostaa kuntoindeksejä.

LÄHDELUETTELO

Bartholomew, David J.(1987). Latent Variable Models and Factor Analysis. New York: Oxford University Press.

Ben-Akiva, M. ja Ramaswamy, R. (1989). Estimation of latent pavement performance from damage measurements. USA, Cambridge. Massachussetts Institute of Technology.

Ben-Akiva, M., Humplick, F., Madanat, S., Ramaswamy, R. (1991). The latent performance approach to infrastructure management. Washington, D.C:Transportation Research Board 70th Annual Meeting.

Everitt, B.S. (1984) .An Introduction to Latent Variable Models.London: Chapman and Hall.

Jöreskog, K.G. (1979).Advances in Factor Analysis and Structural Equation Models. Teoksessa Author's Addendum February, 1979, edit. K.G. Jöreskog and D. Sörbom.

Jöreskog, K. G. (1981).Basic issues in the applications of lisrel.

Jöreskog, K. G., Sörbom, D. (1989).Lisrel 7. User's Reference Guide. Scientific Software, Inc.

Kyyrä T., Olsonen R. (1992).Latent Condition Structure of Asphalt Concrete Roads in Finland. Paper presented in the 6th World Conference on Transport Research, June 1992, Lyon France.

Lawley, D. N., Maxwell, A. E. (1971).Factor Analysis as a statistical method.London:Butterworth & Co. Ltd.

Lehtipuu, E. (1983).Asfalttipäällysteet. Rakentajain Kustannus Oy.Hämeenlinna: Arvi A. Kariston kirjapaino.

Leskinen, Esko (1983).Identifioituvuustarkasteluja lisrel-faktorimallin rakentamisessa. Jyväskylän yliopisto.Tilastotieteen laitos.

Leskinen, Esko (1987).Faktorianalyysi. Konfirmatorisen faktorimallin teoria ja rakentaminen. Jyväskylän yliopiston tilastotieteen laitoksen julkaisuja 1/1987. Jyväskylä: Jyväskylän yliopiston monistuskeskus.

Leskinen, Esko (1989).Spesififaktoreiden mallintamisesta ja identifioituvuudesta kovarianssirakennemalleissa.Jyväskylän yliopisto. Tilastotieteen laitos.

Mäkelä, Martti (1980). Roudan vaikutus rakentamiseen ja routasuojaus. INSKON:n julkaisu 46-80 Kadun ja tien rakentaminen.

Olsson, U. (1979). Maximum likelihood estimation of the polychoric correlation coefficient. *Psychometrika* 44. s.443-460.

Parantainen, Juha (1982). Tien rakenteellinen mitoitus. Helsinki: TKK Offset.

Ramaswamy, Rohit ja McNeil, Sue (1991). Calculation of Aggregate Pavement Condition Indices from Damage Data Using Factor Analysis. Washington, D.C. : Transportation Research Board 70 th Annual Meeting.

Ryynänen, T., Belt, J., Ehrola, E. (1990). Tierakenteen kantavuuksien lämpötilakorjaus. Oulun yliopisto. Tie- ja liikennetekniikan laboratorio. Tiehallituksen geopalvelukeskus. Oulu: 1991.

Talvitie, A. and Olsonen, R. (1988). Selecting asphalt concrete condition states for Finland's highways. Paper presented at the 70th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D.C.

Thompson, P. (1986). Modelling of Pavement Deterioration. Memorandum prepared for Viatek Ltd. and the Finnish Roads and Waterways Administration.

Thompson, P., Olsonen, R., Talvitie, A., ja Tapio, R. (1989). A Micro-Computer Markov Model for Optimal Pavement Rehabilitation Policy. Selected Proceedings of the Fifth World Conference on Transportation Research, vols.1 Yokohama 1989.

TIEL (1990a). Tietoaineisto. Tieliikenneolot ja tienpidon taloudellisuus. Tiehallitus. Esikunta. Helsinki: Valtion painatuskeskus.

TIEL (1990b). Yleisten teiden kunnossapitotilasto. (TVH 712815). Tiehallitus. Tuotannon ohjaus. Helsinki: Valtion painatuskeskus.

TIEL (1991a). Tierakenteen kantavuusvaihtelu ja laskennalliset kantavuudet. (TIEL 3200024). Tiehallitus. Kehittämiskeskus. Helsinki: Tähti-Offset Ky.

TIEL (1991b). Tierakenteen kantavuusmittausohje. Tiehallitus. Tutkimuskeskus. Käyttöohjekirjat. Helsinki: Valtion painatuskeskus.

LÄHDELUETTELO

TIEL (1991c). Hämeen ja Vaasan tiepiirien palvelutasomittarin toimintaperiaatteet. Tielaitos. Hämeen tiepiiri.

TIEL (1991d). Palvelutasomittareiden vertailumittaukset 1991. (TVH 3200008). Tiehallitus. Tielaitoksen selvityksiä 38/1991. Helsinki. Valtion painatuskeskus.

TIEL (1991e). Tieverkon ylläpidon ohjausjärjestelmät. Hips-ohjelmiston lähtötiedot ja perustulokset 1991. Tiehallitus. Tielaitoksen selvityksiä 54/1991. Helsinki. Valtion painatuskeskus.

TIEL (1992). Päällystevaurioiden inventointi. Inventointiohje. Tielaitoksen sisäisiä julkaisuja 11/1992. Tampere. Tehokopiointi Ky.

TVH (1984). Päällystesuunnittelu 1984. (TVH 742853). Tie- ja vesirakennushallitus. Kunnossapitotoimisto. Helsinki: Valtion painatuskeskus.

TVH (1986a). Öljysorapäällysteiden kulutuskerroksen kuntoluokitus. (TVH 743920). Helsinki. Valtion painatuskeskus.

TVH (1986b). Sorateiden kulutuskerroksen kuntoluokitus. (TVH 743921). Helsinki. Valtion painatuskeskus.

VTT (1983). Kestopäällysteen kuluneisuuden vaikutus liikenneonnettomuuksiin. Tutkimusselostus 391. VTT/Tie- ja liikennelaboratorio.

VTT (1986). Kestopäällysteisten teiden kunto vuonna 1985. Tutkimusselostus 535. VTT/Tie- ja liikennelaboratorio.

VTT (1990). Tien kantavuuden mittausrakenteet ja eri laitteilla määritetyt kantavuudet. Tutkimusselostus 784. VTT/Tie- ja liikennelaboratorio.

VTT (1991). PTM-auton uramittauksesta. VTT:n tiedote 25.4.1991. VTT/Tie-, geo- ja liikennetekniikan laboratorio.

Teoreettisen kovarianssimatriisin laskenta

LISREL-mallin parametrisoinnin perusteella lasketaan muuttujan $\mathbf{z}=(\mathbf{x},\mathbf{y})'$ teoreettisen kovarianssimatriisin Σ lauseke, joksi saadaan

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \Sigma_{xx} & \Sigma_{xy} \\ \Sigma_{yx} & \Sigma_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Lambda_x \Phi \Lambda_x' + \Theta_\delta & \Lambda_x \Phi \Gamma' (I-B)^{-1} \Lambda_y' \\ \Lambda_y (I-B)^{-1} \Gamma \Phi \Lambda_x' & \Lambda_y (I-B)^{-1} (\Gamma \Phi \Gamma' + \Psi) (I-B')^{-1} \Lambda_y' + \Theta_\epsilon \end{bmatrix}.$$

Tämä voidaan todeta käyttämällä luvun 3.1 LISREL-mallin oletuksia.

$$\Sigma_{xx} = E(\mathbf{x}\mathbf{x}') = E(\Lambda_x \xi + \delta)(\Lambda_x \xi + \delta)' = E(\Lambda_x \xi \xi' \Lambda_x' + \Lambda_x \xi \delta' + \delta \xi' \Lambda_x' + \delta \delta') = \Lambda_x E(\xi \xi') \Lambda_x' + \Lambda_x E(\xi \delta') + E(\delta \xi') \Lambda_x' + E(\delta \delta') = \Lambda_x \Phi \Lambda_x' + \Theta_\delta$$

$$\Sigma_{xy} = E(\mathbf{x}\mathbf{y}') = E(\Lambda_x \xi + \delta)(\Lambda_y \eta + \epsilon)' = E(\Lambda_x \xi \eta' \Lambda_y' + \Lambda_x \xi \epsilon' + \delta \eta' \Lambda_y' + \delta \epsilon') = \Lambda_x E(\xi \eta') \Lambda_y' + \Lambda_x E(\xi \epsilon') + E(\delta \eta') \Lambda_y' + E(\delta \epsilon') = \Lambda_x \Phi \Gamma' (I-B')^{-1} \Lambda_y',$$

*1 jossa (3.3): mukaan $\eta = B\eta + \Gamma\xi + \zeta \Rightarrow (I-B)\eta = \Gamma\xi + \zeta \Rightarrow \eta = (I-B)^{-1}(\Gamma\xi + \zeta)$ ja $E(\xi\eta') = E(\xi(\xi'\Gamma' + \zeta')(I-B')^{-1}) = \Phi\Gamma'(I-B')^{-1}$, kun $E(\xi\xi') = I$.

$$\Sigma_{yy} = E(\mathbf{y}\mathbf{y}') = E(\Lambda_y \eta + \epsilon)(\Lambda_y \eta + \epsilon)' = E(\Lambda_y \eta \eta' \Lambda_y' + \Lambda_y \eta \epsilon' + \epsilon \eta' \Lambda_y' + \epsilon \epsilon') = \Lambda_y E(\eta \eta') \Lambda_y' + \Lambda_y E(\eta \epsilon') + E(\epsilon \eta') \Lambda_y' + E(\epsilon \epsilon') = \Lambda_y \Omega \Lambda_y' + \Theta_\epsilon \quad *2 = \Lambda_y (I-B)^{-1} (\Gamma \Phi \Gamma' + \Psi) (I-B')^{-1} \Lambda_y' + \Theta_\epsilon$$

$$\begin{aligned} *2 \text{ jossa } \Omega &= E(\eta \eta') = E((I-B)^{-1}(\Gamma\xi + \zeta))((I-B')^{-1}(\Gamma\xi + \zeta')) = \\ &= E((I-B)^{-1}(\Gamma\xi + \zeta))((\xi'\Gamma' + \zeta')(I-B')^{-1}) = \\ &= E((I-B)^{-1}(\Gamma\xi\xi'\Gamma' + \Gamma\xi\zeta' + \zeta\xi'\Gamma' + \zeta\zeta')(I-B')^{-1}) = \\ &= (I-B)^{-1}(\Gamma E(\xi\xi')\Gamma' + \Gamma E(\xi\zeta') + E(\zeta\xi')\Gamma' + E(\zeta\zeta'))(I-B')^{-1} = \\ &= (I-B)^{-1}(\Gamma\Phi\Gamma' + \Psi)(I-B')^{-1} \end{aligned}$$

Koska $\Sigma_{yx} = E(\mathbf{y}\mathbf{x}') = E((\mathbf{x}\mathbf{y})') = E(\mathbf{x}\mathbf{y})' = \Sigma_{xy}'$, on Σ symmetrinen ja saadaan

$$\Sigma_{yx} = \Sigma_{xy}' = (\Lambda_x \Phi \Gamma' (I-B')^{-1} \Lambda_y')' = \Lambda_y (I-B)^{-1} \Gamma \Phi \Lambda_x'.$$

Identifioitavuuden tarkistus toisen kertaluvun faktoreille

Tutkimuksen alustavan LISREL-mallin toisen kertaluvun faktoreiden identifioitavuus osoitetaan laskemalla mallin estimoitavat parametrit ensimmäisen kertaluvun faktoreiden kovarianssimatriisin avulla. Estimoitavat parametrit toisen kertaluvun mallissa ovat latausmatriisissa Γ parametrit $\gamma_{21}, \gamma_{31}, \gamma_{52}$, toisen kertaluvun faktoreiden välisessä kovarianssimatriisissa Φ parametri ϕ_{12} ja jäännöstermien ζ diagonaaliseksi oletetun kovarianssimatriisin Ψ jäännöstermien varianssit $\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4, \psi_5$. Toisen kertaluvun malli on $y = \Lambda_y(\Gamma\xi + \zeta) + \epsilon = \Lambda_y\Gamma\xi + \Lambda_y\zeta + \epsilon$ ja ζ -faktoreiden kovarianssirakenne on $\Omega = \Gamma\Phi\Gamma' + \Psi$.

Kun Ψ oletetaan diagonaaliseksi, kovarianssirakenne $\Omega = \Gamma\Phi\Gamma' + \Psi$ on seuraava:

$$\begin{bmatrix} \omega_{11} & \omega_{12} & \omega_{13} & \omega_{14} & \omega_{15} \\ & \omega_{22} & \omega_{23} & \omega_{24} & \omega_{25} \\ & & \omega_{33} & \omega_{34} & \omega_{35} \\ & & & \omega_{44} & \omega_{45} \\ & & & & \omega_{55} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} \\ \gamma_{31} & \gamma_{32} \\ \gamma_{41} & \gamma_{42} \\ \gamma_{51} & \gamma_{52} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} \\ \phi_{21} & \phi_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{21} & \gamma_{31} & \gamma_{41} & \gamma_{51} \\ \gamma_{12} & \gamma_{22} & \gamma_{32} & \gamma_{42} & \gamma_{52} \end{bmatrix}$$

+diag($\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4, \psi_5$).

Kun kiinnitetyiksi oletetut parametrit asetetaan matriiseihin, saadaan

$$\begin{bmatrix} \omega_{11} & \omega_{12} & \omega_{13} & \omega_{14} & \omega_{15} \\ & \omega_{22} & \omega_{23} & \omega_{24} & \omega_{25} \\ & & \omega_{33} & \omega_{34} & \omega_{35} \\ & & & \omega_{44} & \omega_{45} \\ & & & & \omega_{55} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \gamma_{21} & 0 \\ \gamma_{31} & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & \gamma_{52} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \phi_{12} \\ \phi_{12} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \gamma_{21} & \gamma_{31} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \gamma_{52} \end{bmatrix}$$

+diag($\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4, \psi_5$)=

$$\begin{bmatrix} 1 & \phi_{12} \\ \gamma_{21} & \gamma_{21}\phi_{12} \\ \gamma_{31} & \gamma_{31}\phi_{12} \\ \phi_{12} & 1 \\ \gamma_{52}\phi_{12} & \gamma_{52} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \gamma_{21} & \gamma_{31} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \gamma_{52} \end{bmatrix} + \text{diag}(\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4, \psi_5) =$$

$$\begin{bmatrix} 1+\psi_1 & \gamma_{21} & \gamma_{31} & \phi_{12} & \gamma_{52}\phi_{12} \\ & (\gamma_{21})^2+\psi_2 & \gamma_{21}\gamma_{31} & \gamma_{21}\phi_{12} & \gamma_{21}\gamma_{52}\phi_{12} \\ & & (\gamma_{31})^2+\psi_3 & \gamma_{31}\phi_{12} & \gamma_{31}\gamma_{52}\phi_{12} \\ & & & 1+\psi_4 & \gamma_{52} \\ & & & & (\gamma_{52})^2+\psi_5 \end{bmatrix}.$$

Kovarianssimatriisista saadaan seuraavat yhtälöt, joista estimoitavat parametrit voidaan ratkaista.

$$\begin{aligned} \omega_{11} &= 1 + \psi_1 & \Rightarrow \psi_1 &= \omega_{11} - 1 \\ \omega_{12} &= \gamma_{21} & \Rightarrow \gamma_{21} &= \omega_{12} \\ \omega_{13} &= \gamma_{31} & \Rightarrow \gamma_{31} &= \omega_{13} \\ \omega_{14} &= \phi_{12} & \Rightarrow \phi_{12} &= \omega_{14} \\ \omega_{15} &= \gamma_{52}\phi_{12} & \Rightarrow \gamma_{52} &= \omega_{15}/\omega_{14} \\ \omega_{22} &= (\gamma_{21})^2 + \psi_2 & \Rightarrow \psi_2 &= \omega_{22} - (\omega_{12})^2 \\ \omega_{23} &= \gamma_{21}\gamma_{31} \\ \omega_{24} &= \gamma_{21}\phi_{12} \\ \omega_{25} &= \gamma_{21}\gamma_{52}\phi_{12} \\ \omega_{33} &= (\gamma_{31})^2 + \psi_3 & \Rightarrow \psi_3 &= \omega_{33} - (\omega_{13})^2 \\ \omega_{34} &= \gamma_{31}\phi_{12} & \Rightarrow \gamma_{31} &= \omega_{34}/\omega_{14} \\ \omega_{35} &= \gamma_{31}\gamma_{52}\phi_{12} \\ \omega_{44} &= 1 + \psi_4 & \Rightarrow \psi_4 &= \omega_{44} - 1 \\ \omega_{45} &= \gamma_{52} & \Rightarrow \gamma_{52} &= \omega_{45} \\ \omega_{55} &= (\gamma_{52})^2 + \psi_5 & \Rightarrow \psi_5 &= \omega_{55} - (\omega_{45})^2 \end{aligned}$$

Kaikki estimoitavat parametrit voidaan siis ratkaista kovarianssimatriisin Ω avulla, kun sen alkiot toteuttavat sopivat lisäehdot (esim. $\omega_{14} \neq 0$, $\omega_{44} < 1$ jne.)

LIITE 3

Tutkielman muuttujat

Muuttuja	Muuttujanimi	Mittaustapa
POIKITTAINEN EPÄTASAISUUS		
Urasyvyys (maksimiurasyvyyden keskiarvo)	UMAXKA	Palvelutasomittari
Poikittainen epätasaisuus	POIKT	Palvelutasomittari
VAURIOMUUTTUJAT		
Verkkohalkeamat	VVERKHA	Vaurioinventointi
Pituushalkeamat	VPITHA	Vaurioinventointi
Poikkihalkeamat	VPOIKHA	Vaurioinventointi
Isot halkeamat	VISOHAL	Vaurioinventointi
Saumahalkeamat	VPAALSAU	Vaurioinventointi
Reiät ja purkaumat	VREIKA	Vaurioinventointi
Paikkaukset	VPAIKK	Vaurioinventointi
Reunapainumat	VREUNAP	Vaurioinventointi
PITUUSSUUNTAINEN EPÄTASISUUS		
IRI (=International Roughness Index)	IRI	Palvelutasomittari
Heitot (isot ja pienet yhteensä)	HEITOT	Palvelutasomittari
KANTAVUUSMUUTTUJAT		
Mitoittava kevätkantavuus	TMITKANT	Pudotuspainolaite
Kevätkantavuus	KEVKANT	Pudotuspainolaite
SCI (=Surface Curvature Index)	SCI	Pudotuspainolaite
BCI (=Base Curvature Index)	BCI	Pudotuspainolaite
Alusrakenteen mitoittava kevätkantavuus	AMITKANT	Pudotuspainolaite

Kuntoindeksit

URA-INDEKSI = $4 \cdot \text{urasyvyys} + 0.8 \cdot \text{poikittainen epätasaisuus}$

Indeksin arvo on nolla, jos uraa tai poikit. epätasaisuutta ei ole ja indeksin arvo vaihtelee nollasta 112:een, keskiarvona on 22 yksikköä ja 75 % aineistosta saa alle 30:n indeksin arvoksi.

TASAIUUUS-INDEKSI = $9 \cdot \text{IRI} + 6 \cdot \text{heitot}$

Indeksin arvo on nolla, jos IRI on nolla ja heittoja ei ole. Indeksin arvo vaihtelee nollasta 102:een, keskiarvo on 16.5 ja 75 % aineistosta saa alle 20 indeksin arvoksi.

VAURIOT-INDEKSI = $0.46 \cdot \text{verkkohalkeamat} + 0.28 \cdot \text{pituushalkeamat} + 1.56 \cdot \text{poikittaishalkeamat} + 0.24 \cdot \text{isot halkeamat} + 0.21 \cdot \text{saumahalkeamat} + 4.22 \cdot (\text{reiät ja purkaumat}) + 0.54 \cdot \text{reunapainauumat} + 0.27 \cdot \text{paikat}$

Indeksi saa arvon nolla, jos tiellä ei ole vaurioita. Indeksin keskiarvo on 14 ja 75 % arvoista on alle 20, mutta isoja arvoja esiintyy, jos tie on ongelmallinen (maksimi tässä aineistossa 690).

Päälysrakenteen yläosien kantavuusindeksi on

PÄÄLLYSRAKENNE-INDEKSI = $-28 + 0.087 \cdot \text{kevät kantavuus} + 0.106 \cdot \text{TMITKANT} - 0.054 \cdot \text{SCI}$

Indeksin arvo vaihtelee -40:stä 80:een, keskiarvona on 22 ja 75 % aineistosta saa alle 30 indeksin arvoksi.

Päälysrakenteen alaosien ja alusrakenteen indeksi on

ALUSRAKENNE-INDEKSI = $28 + 0.38 \cdot \text{AMITKANT} - 0.79 \cdot \text{BCI}$

Indeksin arvo vaihtelee -30:stä sataan, keskiarvo on 36 ja 75 % aineistosta on alle 45.

Tien pintakuntoa mittaava indeksi on

PINTAKUNTO-INDEKSI = $7.7 + 0.23 \cdot \text{verkkohalkeamat} + 0.079 \cdot \text{pituushalkeamat} - 0.28 \cdot \text{poikittaishalkeamat} + 0.13 \cdot \text{isot halkeamat} + 0.081 \cdot \text{saumahalkeamat} + 0.71 \cdot (\text{reiät ja purkaumat}) + 0.06 \cdot \text{reunapainauumat} + 0.098 \cdot \text{paikat} + 9.4 \cdot \text{IRI}$

Indeksi vaihtelee nollasta 150:een ja 75 % arvoista on alle 32. Jakaumaltaan indeksi on erittäin vino johtuen vauriomuuttujien jakaumista.

LIITE 4

Tien rakenteen kuntoa mittaava indeksi on

RAKENNEKUNTO-INDEKSI=

$$16 + 0.11 \cdot \text{TMITKANT} + 0.04 \cdot \text{kevätkantavuus} - 0.022 \cdot \text{SCI} + 0.16 \cdot \text{AMITKANT} - 0.25 \cdot \text{BCI}$$

Indeksin keskiarvo on 62 ja arvot vaihtelevat nolasta 132:een. Jakauma on hyvin symmetrinen.

Tien yleiskuntoa mittaava indeksi on

$$\begin{aligned} \text{YLEISKUNTO-INDEKSI} = & 62 - 0.02 \cdot \text{urasyvyys} + 0.01 \cdot \text{poikit.epä-} \\ & \text{tasaisuus} + 2.6 \cdot \text{IRI} + 1.96 \cdot \text{heitot} + 0.065 \cdot \text{verkkohalkeamat} \\ & + 0.016 \cdot \text{pituushalkeamat} + 0.13 \cdot \text{poikittaishalkeamat} + 0.045 \cdot \text{isot} \\ & \text{halkeamat} + 0.024 \cdot \text{saumahalkeamat} + 0.22 \cdot (\text{reiät ja purkaumat}) \\ & + 0.049 \cdot \text{reunapainauumat} + 0.009 \cdot \text{paikat} - 0.046 \cdot \text{kevätkantavuus} \\ & - 0.09 \cdot \text{TMITKANT} + 0.028 \cdot \text{SCI} - 0.14 \cdot \text{AMITKANT} + 0.24 \cdot \text{BCI} \end{aligned}$$

Indeksin arvo vaihtelee -40:stä 120:een, keskiarvo on 27 ja 75% arvoista on alle 37.

Aineisto, josta indeksit on laskettu kattaa 1557 kilometriä tietä sadan metrin mittauksina.

Muuttuja	Keskiarvo	Keskihajonta	Minimi	Maksimi
Urasyyvyys	4,68	3,24	0	26,50
Poikittainen epätasaisuus	4,30	2,00	0	16,30
IRI	1,83	0,83	0	9,52
Heitot(isot+pienet)	0,01	0,19	0	7,00
Verkkohalkeamat	2,73	12,66	0	284,00
Pituushalkeamat	16,09	26,75	0	635,00
Poikittaishalkeamat	2,36	3,37	0	60,00
Isot halkeamat	0,41	3,50	0	100,00
Saumahalkeamat	12,70	24,32	0	176,00
Reiät ja purkaumat	0,26	1,93	0	162,00
Paikkaukset	0,95	7,49	0	266,00
Reunapainauumat	0,13	2,36	0	100,00
Kevätkantavuus	332,08	81,24	69	666,00
TMITKANT	273,17	70,13	48	607,00
SCI	125,08	38,24	31	407,00
BCI	32,45	10,04	11	87,00
AMITKANT	85,76	28,58	14	200,00

TIELAITOKSEN SELVITYKSIÄ

- 21/1992 The Effects of Motorways on the National Economy. TIEL 3200077E
- 22/1992 Quality Requirements of Prefabricated Strip Drains; Quality Control and Test Methods. TIEL 3200057E
- 23/1992 Sairaalahoittoa vaatineet loukkaantumiset liikennealueilla Suomessa vuonna 1989. TIEL 3200078
- 24/1992 Liikenne ja maankäyttö, esiselvitys. TIEL 3200079
- 25/1992 Liikenteen profiili. TIEL 3200080
- 26/1992 Tiehankkeiden yhteiskuntataloudellisen vaikutukset. TIEL 3200081
- 27/1992 Yleisten teiden liikennemelu, otantaselvitys, TIEL 3200082
- 28/1992 Tien suuntauksen suunnittelu. TIEL 3200083
- 29/1992 Onnettomuudet pääteiden tasoliittymissä. TIEL 3200084
- 30/1992 Jätäkänkynttilä; The Lumberjack's Candle. TIEL 3200085
- 31/1992 Pohjaveden maatiivistesuojan tiivistäminen. TIEL 3200086
- 32/1992 Talvikunnossapidon sääindeksi. Tuotannon kehittämispalvelut
- 33/1992 Tieverkon kehittämishankkeiden hallinnointi: Projektioorganisaatiot, loppuraportti. TIEL 3200087
- 34/1992 Tienvarsialueiden kasvittamisen ja hoidon kehittäminen luonnonmukaisempaan suuntaan. TIEL 3200088
- 35/1992 Päälystetyn tien kuntoennusteet. TIEL 3200089
- 36/1992 Päälystettyjen teiden pintakunnon luokittelu. TIEL 3200090
- 37/1992 Satamiin johtavien erikoiskuljetusreittien kehittäminen
- 38/1992 CMA:n ympäristövaikutuksia ja käyttökokemuksia; kirjallisuustutkimus. TIEL 3200092
- 39/1992 Henkilöauton verotuksen muuttamisen vaikutuksia liikenteeseen. TIEL 3200093
- 40/1992 Hirvieläinonnettomuudet yleisillä teillä 1991. TIEL 3201921-92
- 41/1992 Liikenteen ja muiden toimintojen turvallisuuden vertailu 1988-1990. TIEL 3200094
- 42/1992 Pääväylät kaupunkialueilla; tasoliittymät. TIEL 3200095
- 43/1992 Reittiohjaus Lahdentiellä, esiselvitys. TIEL 3200096
- 44/1992 Seurannan sisällyttäminen tiehankkeisiin -luonnonolot. TIEL 3200097
- 45/1992 Liikennevalojen kunnossapitotutkimus. TIEL 3200098
- 46/1992 Syvästabiloinnin laadunvalvontaohje. TIEL 3200099

ISBN 951-47-6511-7
ISSN 0788-3722
TIEL 3200100